اختيـــار المحـــركات الكهـــربية

د. فتحي عبد القادر
أستاذ الآلات الكهربية - هندسة شبين الكوم

للمحركات الكهربية أنواع متعددة .. فمنها المحركات التى تعمل على التيار المستمر مثل محرك التوالى ومحرك التوازى والمحرك المركب.. والمحركات التى تعمل على التيار المتردد ثلاثى الأوجه مثل المحرك التأثيرى قفص السنجاب Squirrel Cage Induction Motor وحلقات الانزلاق Slip Ringsوالمحرك التزامنى Synchro-nous Motor بأنواعه المختلفة .. وتلك التى تعمل على التيار المتردد ذى الوجه الواحد مثل محرك التوالى والمحرك التأثيرى بأنواعه المختلفة.

ويرجع السبب فى تعدد أنواع المحركات إلى أنه لا يوجد محرك منها يمكن أن نعتبره محركاً مثالياً يناسب جميع الأحمال ويعمل فى كل الظروف ويفى بكل الاحتياجات بسعر مناسب وتكاليف تشغيله قليلة وحاجته للصيانة نادرة. وعلى ذلك ..فإن كل محرك يتم تصنيعه تكون له خواص محددة ومزايا وعيوب تختلف من نوع إلى آخر.

ولكى نحدد نوع وخواص المحرك المطلوب فإننا يجب أن نحدد خواص الأداء وظروف التشغيل للحمل الميكانيكى الذى سوف يديره هذا المحرك.. مثل:

- درجة حرارة الوسط.
- معدلات زيادة وخفض الحمل على المحرك.
- معدلات توصيل وفصل المحرك.
- درجة الحماية للمحرك.
- منحنيات الأداء للمحركات .
- منحنيات الأداء للحمل الميكانيكى.

وسوف تتناول هذه الدراسة هذه النقاط بشىء من التفصيل.. لتفيد ليس فقط عند اختيار المحرك.. وإنما أيضاً عند تشغيل الماكينات المختلفة لمعرفة الطرق المناسبة للتشغيل وضبط وصيانة وسائل التحكم فى تشغيل المعدات التى تعمل بالمحركات الكهربية

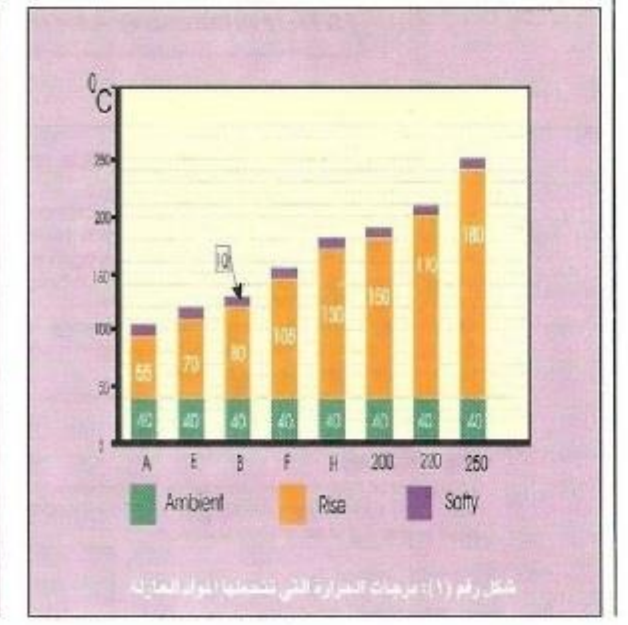
١ ـ درجة حرارة الوسط الذى يعمل فيه المحرك:

نلاحظ أن المحركات الكهربية تصمم لتتحمل العمل فى وسط درجة حرارته ٤٠م .. وإذا كانت درجة الحرارة أقل من ٤٠م فإنه يمكن تحميل المحرك بأكثر من الحمل الكامل له حسب درجة هذه الحرارة.. والعكس إذا كانت درجة حرارة الوسط أكبر من ٤٠م حيث يجب أن يعمل المحرك بحمل أقل من الحمل الكامل له.

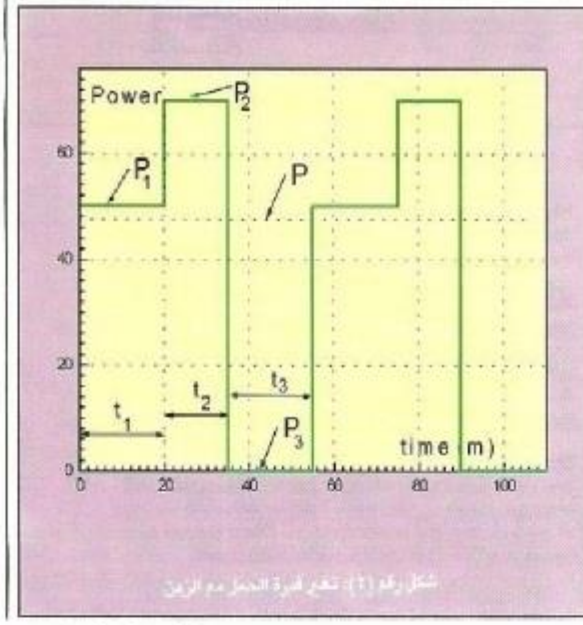
وعندما يعمل المحرك بالحمل الكامل.. فإن حرارته تصل إلى درجة تتوقف على نوع المواد العازلة المستخدمة داخل المحرك. وأكثر المواد العازلة شيوعاً هى مواد من نوع (Class B) التى تتحمل حتى ١٣٠م أو من نوع (Class F) التى تتحمل حتى ١٥٥م.. أو من نوع (Class H) التى تتحمل حتى ١٨٠م.

ويقع الكثير من المهندسين فى خطأ شائع عندما يفضلون المحرك المصنوع من مواد عازلة (Class H) على المحرك (Class F).. أو المحرك (Class F) على المحرك (Class B).. وذلك بسبب الاعتقاد الخاطىء بأن المحرك (Class H) يتحمل العمل فى وسط درجة حرارته مرتفعة عن تلك التى يتحملها اى من (Class F) أو (Class B).. أو أن المحرك (Class H) يتحمل زيادة الحمل عليه عن المحرك (Class F) أو (Class B).

والحقيقة أن أياً من المحركات (Class B) أو (Class F) أو (Class H) تصل فيه درجة الحرارة إلى أقصى قيمة (١٣٠ أو ١٥٥ أو ١٨٠م على الترتيب) عندما يعمل عند الحمل الكامل فى وسط درجة حرارته ٤٠م. أما إذا زادت حرارة الوسط عن ٤٠م أو زاد الحمل عن الحمل الكامل.. فإن هذه الأنواع الثلاثة سوف تصبح درجة حرارتها أكثر من تلك التى يتحملها أى



شكل رقم (١): درجات الحرارة التي تتحملها المواد العازلة



شكل رقم (٢): تغير قدرة الحمل مع الزمن

منهم وتكون درجة الخطورة متساوية على كل منهم. أما ميزة المواد العازلة (Class H) عن المواد العازلة (Class B مثلاً.. فإنها تعتبر ميزة للمصنع الذي ينتج المحرك حيث تكون كمية أسلاك النحاس والصلب السليكونى وبالتالى تكاليف المحرك (Class H) أقل من المحرك (Class B).

ولهذا.. فإن المهندس لا يجب أن يضع في المواصفات التي يحددها عند طلب شراء المحرك درجة العزل Insula-tion Class لأن الدرجة العالية مثل (Class H) لا تعطى ميزة لمستخدم المحرك عن درجة أقل مثل (Class B) إلا إذا كان المطلوب حجماً صغيراً للمحرك وبالتالى وزناً صغيراً وعزم قصور ذاتى صغير.

والجدول رقم (١) يبين درجة العزل وأقصى درجة حرارة تتحملها عوازل المحرك حسب المواصفات القياسية الدولية (IEC 34 -1).

وعندما تكون درجة حرارة الوسط ٤٠ْم فإن الارتفاع فى درجة حرارة المحرك المسموح بها يمكن حسابها لكل درجة عزل.. بطرح درجة حرارة الوسط مضافاً إليها ١٠ْم كعامل أمان للمواد العازلة من أقصى درجة حرارة تتحملها المواد العازلة. ويوضح الشكل رقم (١) هذه القيم للمواد العازلة المختلفة.

وعلى سبيل المثال.. فإن أقصى درجة حرارة تتحملها درجة العزل (CLass B) هى ١٢٠ْم.. ويكون أقصى إرتفاع أو زيادة مسموح بها فى درجة حرارة المحرك منذ بدء حركته إلى ما بعد استقرار درجة الحرارة هو: ١٢٠ − (٤٠ + ١٠) = ٨٠ْم. وعلى ذلك .. فإذا كانت حرارة الوسط ٤٠ْم فإن أقصى زيادة مسموح بها فى حرارة المحرك هى ٨٠ْم فى حالة (Class F). وتكون أقصى درجة حرارة يمكن أن يصل إليها هى ١٢٠ْم ..وتبقى ١٠ْم كعامل أمان للمحرك.

وتتغير قيمة أقصى إرتفاع فى الحرارة بتغير درجة حرارة الوسط حيث تزيد هذه القيمة لكل المواد العازلة إذا إنخفضت درجة حرارة الوسط.. وتكون قيمة الزيادة فى أقصى إرتفاع فى درجة الحرارة هى نفس قيمة إنخفاض درجة حرارة الوسط عن ٤٠ْم والعكس.

فإذا انخفضت حرارة الوسط إلى ٢٥ْم.. ففى حالة (Class B) مثلاً فإن أقصى إرتفاع يزيد من ٨٠ْم إلى [٨٠ + (٤٠ − ٢٥)] أى ٩٥ْم .. وتبقى أقصى درجة حرارة مسموح بها ثابتة وهى ١٢٠ْم.

ويمكن معرفة درجة حرارة المحرك بعدة طرق كما جاء فى المواصفة الدولية (IEC34-1).. وأهم هذه الطرق هى حساب الارتفاع فى درجة حرارة ملفات المحرك ذاتها من العلاقة التالية:

$$\theta = \{(R2 - R1)/R1\}(235 + \theta_1)$$

حيث:

θ : الارتفاع فى درجة الحرارة (ْم).

θ_1 : درجة حرارة الوسط قبل تشغيل المحرك (ْم).

R1: مقاومة أى من ملفات المحرك.. أو المقاومة بين أى من طرفى المحرك قبل تشغيله حيث تكون درجة حرارته مساوية لدرجة حرارة الوسط.. وتقاس بجهاز الأوميتر.

R2: المقاومة بين نفس الأطراف (التى تم قياس R1 بينها) بعد تشغيل المحرك لأى زمن وبأى قيمة للحمل.. حيث تكون θ هى الارتفاع فى درجة الحرارة لهذا الزمن وهذا الحمل.

والرقم (235) هو رقم ثابت يستخدم فى حالة أسلاك النحاس.. ويتغير إلى (225) فى حالة أسلاك الألومنيوم.

ويمكن حساب درجة حرارة المحرك بجمع($\theta+\theta_1$) .وبزيادة الزمن حتى ثبات θ تقريباً.. يمكن الاستدلال على حالة المحرك ومعرفة إمكانية زيادة الحمل عليه عن هذه القيمة أو خفض هذا الحمل.

٢ ـ معدلات زيادة وخفض الحمل على المحرك:

عندما يعمل المحرك بحيث يكون بدون حمل لفترات معينة وبحمل كامل لفترات أخرى وبحمل متوسط لفترات غيرها .. فإن درجة حرارة المحرك تكون أقل منها لو كان محملاً بالحمل الكامل طوال الوقت.. ويكون المحرك غير مستغل استغلالاً كاملاً. وفى هذه الحالة فإن محركاً قدرته أقل من قدرة هذا المحرك يمكن أن يدير هذا الحمل بكفاءة . وبمعنى آخر.. فإنه إذا كان يتم تحميل الحمل الميكانيكى بالكامل على المحرك طوال الوقت.. فإن اختيار المحرك يتم بحيث تكون قدرته مساوية لقدرة هذا الحمل الميكانيكى. أما إذا كان الحمل الميكانيكى يتم تحميله على المحرك بقيم تختلف من وقت لآخر.. فيتم اختيار المحرك بحيث تكون قدرته أقل من أكبر قدرة للحمل الميكانيكى.

وتحسب قدرة المحرك من القدرات مختلفة القيمة كما يلى:

$$P=\sqrt{(P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2+...)/(t_1 + t_2+...)}$$

حيث:

P: قدرة المحرك الكهربى المناسب للحمل الميكانيكى.

P_1: قدرة المحرك عندما يعمل بحمل ميكانيكى معين (يمكن أن يكون أقل أو أكبر من P) خلال فترة زمنية t1.

وهكذا باقى القدرات P2،P3،... عندما تستمر فترات زمنية t3، t2، ... كما فى الشكل رقم (٢) الذى فيه (P1 = 50, P2 = 70 , P3 = 0) .وتكون القدرة المناسبة للمحرك (P = 47.4) وهى أصغر من كل من (P1 , P2) وذلك لأن P3 كانت صغيرة وتساوى الصفر كحالة المحرك عند اللاحمل.

٣ ـ معدلات توصيل وفصل المحرك:

فى البند السابق.. كان المحرك متصلاً بالمنبع الكهربى وتتغير قيمة الحمل من فترة إلى أخرى ..أما فى هذا البند فإن المحرك يتم توصيله وفصله من المنبع. وتسمى طبيعة التشغيل هذه بأن المحرك يصبح Multy Starting.. أى تتكرر فيه عملية بدء الدوران.. كما يحدث فى محركات المصاعد الكهربية.

ونظراً لأن تيار بدء الدوران تكون قيمته أضعاف تيار الحمل الكامل المصمم عليه المحرك.. فإن عملية بدء الدوران تؤدى إلى ارتفاع درجة حرارة المحرك وخصوصاً أن معظم هذه الأحمال (المصاعد) لا تستخدم أية طريقة لإنقاص هذا التيار عند البدء. ولهذا.. يركب على المحرك محرك آخر يدير مروحة قوية لتبريده تتوقف قدرتها على عدد مرات توصيل وفصل المحرك فى الساعة.

ويلاحظ أن مثل هذه الحالة تحدث بدرجة أقل فى حالة المخرطة الميكانيكية التى يتم تشغيل وإيقاف الظرف فيها بتوصيل وفصل المحرك الكهربى. ويسبب هذا الفصل والتوصيل زيادة فى درجة حرارة المحرك الأمر الذى يتطلب - فى مثل هذه المخرطة - إستخدام محرك كهربى ذى قدرة أكبر من حاجة الحمل الميكانيكى ذاته.. بينما باستخدام طريقة ميكانيكية لتشغيل وإيقاف ظرف المخرطة فإن المحرك الكهربى يكون ذا قدرة مساوية للقدرة الميكانيكية.

وتعتبر عملية تكرار توصيل وفصل

⇦

جدول رقم (١): أقصى درجة حرارة تتحملها عوازل المحركات

درجة العزل	A	E	B	F	H	200	220	250
أقصى درجة حرارة (ْم)	105	120	130	155	180	200	220	250

جدول رقم (٢) : مواصفات رقم العشرات فى درجة الحماية

رقم العشرات	درجة الحماية من تماس أو دخول أجسام غريبة
0	لا توجد أية حماية.
1	الحماية ضد دخول أجسام غريبة ذات قطر أكبر من ٥٠مم.
2	الحماية ضد دخول أجسام غريبة ذات قطر أكبر من ١٢مم.
3	الحماية ضد أجسام غريبة ذات قطر أكبر من ٢,٥مم.
4	الحماية ضد دخول أجسام غريبة ذات قطر أكبر من ١مم.
5	الحماية ضد دخول الأتربة التى تترسب وتكون ضارة بالمحرك. ودخول الأتربة ليس ممنوعاً كلياً ولكن الأتربة يجب أن لا تدخل بكمية تكون كافية لعدم تشغيل المحرك بطريقة مناسبة كما أن الحماية تكون كاملة ضد دخول أجسام غريبة.
6	الحماية كاملة ضد دخول أى أتربة.. والحماية كاملة ضد دخول أجسام غريبة.

جدول رقم (٣): مواصفات رقم الآحاد فى درجة الحماية

رقم الآحاد	درجة الحماية ضد دخول المياه
0	لا توجد حماية.
1	توجد حماية. المحرك يتحمل تساقط نقط المياه التى تسقط رأسياً على المحرك.
2	المحرك يتحمل نقاط المياه التى تتساقط عليه رأسياً وأيضاً إذا حدث ميل للمحرك بزاوية حتى ١٥ْ.
3	المحرك يتحمل تساقط المياه عليه رأسياً أو التى تسقط بميل يصنع زاوية مع المستوى الرأسى حتى ٦٠ْ.
4	المحرك يتحمل المياه التى ترش عليه من أى إتجاه.
5	المحرك يتحمل المياه التى تسلط عليه من خرطوم مياه فى أى إتجاه.
6	المحرك يتحمل المياه التى تسلط عليه بشكل نافورة قوية (Powerful Wa-ter Jet) من أى إتجاه.
7	المحرك يتحمل أن يغمر فى المياه حتى ضغط مياه محدود.
8	المحرك يتحمل أن يغمس فى المياه طوال الوقت وتحت ظروف تشغيل يحددها الصانع.



المحرك من أهم العوامل التي تمثل خطورة على المحركات الكهربية والتى يجب تفاديها بقدر الإمكان أو زيادة تبريد المحرك أو زيادة قدرته وهو ما يتوقف على ظروف وطبيعة كل حالة.

٤ ـ درجة الحماية للمحرك الكهربي:

يتم تقسيم درجة الحماية للمحركات الكهربية التى تعمل على جهد حتى ٧٢,٥ ك ف بتصميم الشكل المناسب لأوجه المحرك وصندوق أطرافه وكل الأجزاء الميكانيكية التى تضمن هذه الحماية طبقاً للمواصفات القياسية (IEC 34 - 5).. وتشمل:

أ ـ حماية الأشخاص عند لمس المحرك او الاقتراب من أى جزء فيه.. وكذلك الحماية من أن يمس الإنسان أى أجزاء دواره.. بما يعنى أن أى جزء من جسم الإنسان مثل اليد أو الأصابع لا تستطيع أن تدخل داخل المحرك أو تصل إلى الأجزاء الدوارة به.. وأيضاً حماية المحرك من أن تمسه أية أجسام غريبة تدخل فيه.

ب ـ حماية المحرك من دخول آية مياه إليه.

وهذه المواصفات القياسية:

ــ تطبق فقط على الغلاف الحاوى للمحرك والأجزاء الميكانيكية الخارجية حيث يتحدد بالتالى الطريقة التى تصنع بها هذه الأجزاء حتى تتحقق المواصفات التى يجب الوصول إليها عند الاستخدام.

ــ لا تحدد درجة حماية المحرك من تحطم أجزائه الميكانيكية عندما يتعرض لمخاطر الانفجار.

ـ تحدد الاختبارات اللازمة للتأكد من وصول كل جزء إلى الدرجة المحددة له.

طريقة كتابة درجة الحماية

تتكون درجة الحماية من حرفين ورقمين مثل IP54. الحرفان هما (IP) وهما اختصار لكلمتى International Protection أما الرقمان فأحدهما فى خانة الآحاد والآخر فى خانة العشرات:

ـ رقم العشرات يأخذ صفر أو واحد أو اثنين ويتزايد حتى رقم ٦. وهذا الرقم يحدد درجة الحماية من تماس أو دخول أجسام غريبة للمحركات .وهذه الدرجات مفصلة وموصفة فى الجدول رقم(٢).

ـ أما رقم الآحاد.. فيأخذ صفر أو واحد أو اثنين ويتزايد حتى رقم ٨ . وهذا الرقم يحدد درجة الحماية من دخول المياه .. ويوضح الجدول رقم (٣) هذه الدرجات مفصلة وموصفة .

اعتبارات تؤخذ عند إجراء الاختبارات اللازمة للتأكد من سلامة درجة الحماية:

ـ الاختبارات اللازمة التأكد عن سلامة درجة الحماية.. هى اختبارات لعينات من المحركات وليست على كل محرك ينتج.

ـ يجب أن تجرى الاختبارات على عينة جديدة ونظيفة وكاملة الأجزاء.

ـ يجب أن تكون المياه التى تجرى بها اختبارات الحماية مياه متجددة وخالية من أية إضافات مثل مياه الشرب.

ــ إذا كان رقم العشرات فى درجة الحماية هو ١ أو ٢.. أو كان رقم الآحاد هو ١ أو ٢ أو ٣ أو ٤.. فإن الفحص والمعاينة بالنظر سوف يكون كافياً. وإذا حدث شك فتجرى الاختبارات الموضحة فى الجدولين رقمى(٤) و(٥).

العدد القادم:

ـ منحنيات الأداء للمحركات.

ـ منحنيات الأداء للأحمال .

جدول رقم (٤)
اختبار درجة الحماية من تماس أو دخول أجسام غريبة إلى المحرك

رقم العشرات	مواصفات الاختبار: الحماية من التماس	مواصفات الاختبار: الحماية من دخول أجسام غريبة
0	لا توجد اختبارات	لا توجد اختبارات
1	تستخدم كرة صلبة بقطر ٥٠ مم وتضغط فى فتحات الغلاف بقوة ٥٠ نيوتن. ويجب أن لا تدخل الكرة بحيث تمثل خطورة على المحرك.	
2	اختبار دخول اصابع اليد يجرى كما هو موصى به فى المواصفة: DIN 57470 - PART I	تستخدم كرة صلبة بقطر ١٢,٠٥ مم ــ وتضغط فى فتحات الغلاف بقوة ٣٠ نيوتن. ويجب أن لا تدخل الكرة بحيث تمثل خطورة على المحرك.
3	يستخدم سلك معدنى بقطر ٢,٥٥ مم ويضغط به فى فتحات الغلاف بقوة ٣ نيوتن ـ ويجب أن لا يدخل السلك داخل أجزاء المحرك بحيث يمثل خطورة.	
4,5,6	يستخدم سلك صلب بقطر ١,٠٥ مم ويضغط به فى فتحات الغلاف بقوة ١ نيوتن ـ ويجب أن لا يدخل السلك داخل أجزاء المحرك بحيث يمثل خطورة. غرفة اختبار الأتربة كما بالمواصفة DIN 40052	

جدول رقم (٥) : اختبار درجة الحماية من دخول المياه
(اختبار للمواصفة المحددة فى رقم الاحاد فى درجة الحماية للمحرك)

رقم الآحاد	مواصفات الاختبار
0	لا توجد اختبارات.
1 . 2	وحدة التنقيط كما هو موضح فى المواصفة DIN 40053 PART 1,2
3 . 4	أنبوبة المياه المتأرجحة والرشاش حسب المواصفة DIN 40053 PART 2,3
5	تستخدم فونية رش المياه رقم ٦ حسب المواصفة DIN 40053 PART 4
6	تستخدم فونية رش المياه رقم ١٢ حسب المواصفة DIN 40053 PART 4
7	يغمر المحرك بالكامل فى المياه بالشروط التالية: ـ أن يكون مستوى المياه فوق أعلى نقطة فى المحرك بمسافة لا تقل عن ١٥٠ مم. ـ أدنى نقطة فى المحرك يجب أن تبعد عن المياه بما لا يقل عن متر. ـ أن يستمر الاختبار فترة لا تقل عن نصف ساعة. ـ درجة حرارة المياه يجب أن لا تختلف عن درجة حرارة المحرك بأكثر من ٥°م وهذا الاختلاف يمكن تعديله إذا رأت اللجنة الفنية ذلك خصوصاً إذا كان المحرك يعمل فى هذا الاختبار. ويجب أن لا تتخلل المياه المحرك بدرجة تمثل خطورة.
8	يتم الاتفاق على الاختبارات بين الصانع والمستهلك بحيث لا يقل المستوى عما جاء فى رقم7 السابق.

اختيـــار المحركـــات الكهربيـــة (٢)

د. فتحي عبد القادر
أستاذ الآلات الكهربية ـ هندسة شبين الكوم

تتـاولنـا في العدد السـابـق دراسـة أربعة من العوامل التى تؤثر على اختيار المحـركات الكهـربيـة.. وفي هذا العـدد نستكمـل الـدراسـة بتنـاول كـل مـن منحنيـات الأداء للمحركـات الكهربيـة ومنحنيات الأداء للحمل الميكانيكي.

٥ـ منحنيات الأداء للمحركات الكهربية

في عجالة نستطيع أن نلخص الخواص والمواصفـات التى يجب أن يتمتـع بها المحرك الكهربى المثالى ـ في التالى:

١ ـ ثمنه عند الشراء.. أقل ما يمكن.
٢ ـ كفاءته.. Efficiencyأعلى ما يمكن حتي تقل تكـاليف التشغيل Running Cost.
٣ ـ تكاليف الصيانة له.. أقل ما يمكن.
٤ ـ عمره الافتراضى.. طويل جداً.
٥ ـ عزمه عند بدء الدوران.. عالى.
٦ ـ يشغل الحمـل بسرعات مختلفـة. بحيث يمكـن تغيير السرعة بـأية قيمـة صغيرة وخـلال مـدى كبير السرعـة (كمثـال من حـوالى ١٠٠ لفة/ دقيقـة حتى حوالى ١٠ آلاف لفة/ دقيقة).
٧ ـ سرعة المحرك عنـد القيمة المضبوط عليها .. تبقى كما هـى مهما تغير عزم الحمل بالزيادة أو النقصان.
٨ ـ وسيلـة التحكم في سرعـة المحرك.. ثمنهـا قليـل بـالنسبـة لثمـن المحـرك وتكاليف تشغيلها وصيانتها قليلة.
٩ ـ معـامل القـدرة .. يساوى الـواحد الصحيح.
١٠ ـ قيمة العـزم.. عـاليـة بالنسبـة للأمبير High Torque Per Ampere.
١١ ـ يمكنه العمل على المصدر الكهربى المتـاح سـواءً كان ثـلاثـى أو أحـادى الأوجه بتيار مستمر أو متردد.

أنواع المحركات الكهربية :

وبالطبـع .. فليس هنـاك نوع محدد من المحركات له كل الخواص السابقة.. ولكن لكل نوع مزايـا هى جزء من هذه الخواص.. وعيـوب هـى عـدم تحقيـق باقى هذه الخواص.

ويمكـن تقسيـم أنـواع المحـركـات الكهربية إلى الأنواع العامة التالية:

أ ـ محركات التيار المستمر DC Motors:

وتستخـدم عندمـا يكون الحمـل في حاجـة للعمـل عنـد سرعـات مختلفـة ويحتاج لعزم بدء عالى. وهذه المحركات تعطى أكبر عـزم بدء عـن أى نوع آخـر من المحركات ـ يصل إلى حوالى خمسة أضعـاف عزم الحمـل الكامـل ـ وهـى أفضل المحركات التـى يمكن التحكم في سرعتها بكفاءة ودقة وحسـاسية عالية ومدى كبير للتغير في السرعة.. والتكلفة الابتـدائية وتكـاليـف التشغيل لمنظـم السرعة فيها تكون أقل من أى نوع آخر من المحركات. وعلى هذا.. فإن محركات التيـار المستمر تعطـى أكبر عزم بـدء.. وتعتبر من أفضـل المحركات مـن حيث تنظيم السرعـة. أما عيـوبها الرئيسيـة فتتمثل في أن ثمنهـا أغلى من أى محرك آخر وتحتاج لصيانة متكررة.

ب ـ المحركات التزامنية Synchronous Motors

وهى أفضـل المحركات التـى تعطى سرعـة ثـابتـة مهما تغير عـزم الحمـل ويمكنها أن تعمل بمعامـل قدرة متقدم Lead Power Factor.. إلا أن عيبهـا الرئيسى هو أنها أقل المحركات في عزم البدء والـذى يصل إلى حـوالى ٢٠٪ من عزم الحمل الكامل.

جـ ـ المحركات التـاثيرية ثلاثية الأوجه 3 Phase Induction Motors:

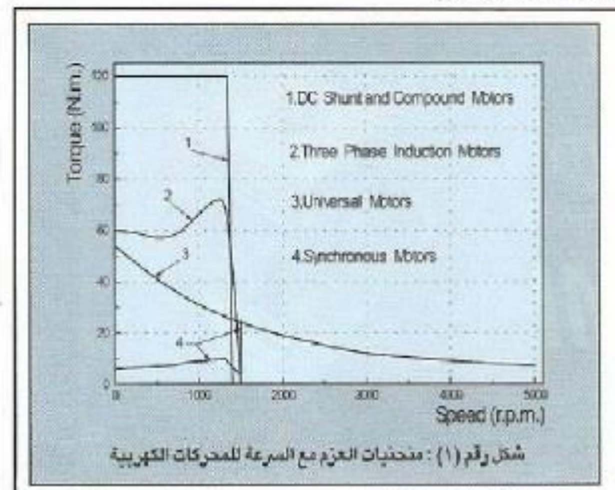
وهـى أقـل المحركـات ثمنـاً وأقلهـا حاجة للصيانة.. إلا أن عيبها الرئيسى أنها مازالـت أعلى المحركات تكلفـة من حيث التحكم في السرعة حيث يصل ثمن منظـم السرعة إلى حـوالى أربعة أمثـال ثمـن المحرك ذاتـه.. بينما يكون ثمـن منظـم السرعـة في محركـات التيـار المستمـر حـوالى ٢٠٪ فقـط مـن ثمـن المحرك. والعيب الثانـى لهذه المحركات هو حاجتها إلى تحسين معامل قدرتها. ويـلاحـظ أن عزم البـدء لها يصـل إلى حوالى ٢٥٠٪ عزم الحمل الكامل.

د ـ المحـركـات التأثيريـة ذات الـوجـة الواحد Single Phase Induction Motors:

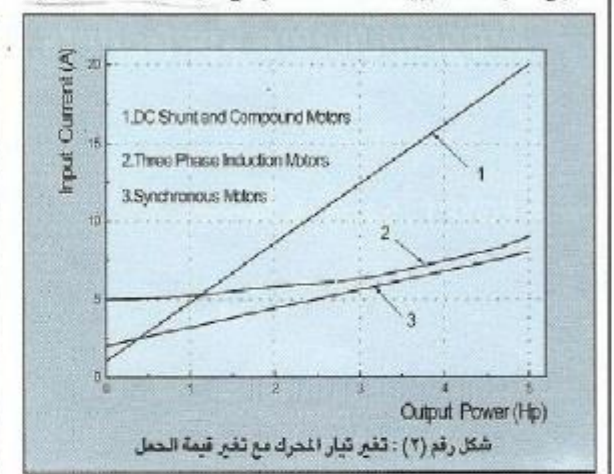
تتشابـه هذه المحركـات في مزايـاها وعيوبها مـع المحركـات التأثيريـة ذات الثلاثة أوجه.. إلا أن المحركات التأثيرية ذات الوجه الواحـد أعلى من حيث شدة التيـار وأقل مـن حيث معـامل القـدرة وأكثر حـاجة للصيانـة من المحـركات التأثيرية ذات الثلاثة أوجه.. ولهذا فإن المحركات التأثيرية ذات الـوجة الواحد تستخدم بـدلاً من المحركات التـأثيرية ذات الثلاثـة أوجه فقـط عندمـا يكون المصدر الكهـربى المتاح ذا وجـه واحد ولا يوجـد مصدر ثلاثى الأوجـه. ويقع الكثيرون في خطـأ شـائع عنـدمـا يستخدمون محركات تأثيرية ذات وجه واحد بـدلاً من ذات الثلاثة أوجـه رغم توفر المصدر الكهربى ثلاثى الأوجه.

هـ ـ المحركـات العامـة Universal Motors:

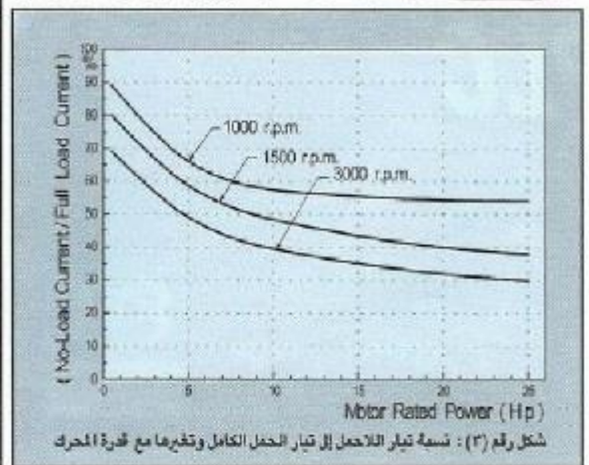
وهى تشبه محركات التيار المستمر التـوالى.. إلا أن العضـو الثـابـت فيهـا مكون مـن رقائق الصلـب السليكونـى بدلاً من الحديـد المصمت.. ولهذا فإنها تعمـل على مصـدر التيـار المستمـر أو المتردد.. وعزم البدء فيها عال جداً يزيد عن خمسة أضعاف عزم الحمل الكامل. وهى أعلى المحركات سرعة حيث يمكنها أن تصـل إلى حـوالى عشرة آلاف لفـة/ دقيقة. وعيوبها الرئيسية تتركز في تغير



شكل رقم (١) : منحنيات العزم مع السرعة للمحركات الكهربية



شكل رقم (٢) : تغير تيار المحرك مع تغير قيمة الحمل



شكل رقم (٣) : نسبة تيار اللاحمل إلى تيار الحمل الكامل وتغيرها مع قدرة المحرك

سرعتها بنسبة كبيرة بتغير عزم الحمل.. كما انها اكثر المحركات حاجة للصيانة.

و ـ المحركات الخاصة Special Motors

ـ مثل Solid Rotor, Reluctance, Hysteresis: وهى محركات مازالت تحت التطوير واستخدامها مازال على نطاق ضيق جداً في القدرات الصغيرة. وأهم مزاياها.. بساطة التركيب وندرة حاجتها للصيانة. أما المحركات الخاصة من نوع Servo, Stepper Motorsفهى محركات أقل من واحد حصان وتستخدم في وسائل التحكم المختلفة.

مقارنة بين خواص المحركات المختلفة:

يوضح الشكل رقم (١) مقارنة بين خاصية عزم المحرك خلال فترة البدء لأكثر المحركات شيوعاً وهى: محركات التيار المستمر التوازى والمركب - المحركات التأثيرية ثلاثية الأوجه - المحركات العامة ـ المحركات التزامنية. وفى هذا الشكل افترضنا قدرة خرج واحدة للأنواع الاربعة مقدارها ٥ حصان.. وكانت السرعة ـ الأكثر شيوعًا ـ حول ١٥٠٠ لفة/ دقيقة.. عدا المحرك العام الذى تكون سرعته عالية (٥٠٠٠ لفة/ دقيقة) ويكون عزم الحمل الكامل ـ للمحركات ١٥٠٠ لفة/ دقيقة ـ حول ٢٤ نيوتن متر.. وعزم العمل الكامل للمحرك العام ٢ر٧ نيوتن متر.

وفى هذا الشكل.. نجد أن عزم البدء لمحرك التيار المستمر هو الأكبر (١٢٠ نيوتن متر) .. يليه المحرك التأثيرى ثلاثى الأوجه (٦٠ نيوتن متر) ثم المحرك العام (٤٥ نيوتن متر).. وأقلها المحرك التزامنى (٦ نيوتن متر)..

ويلاحظ أن محرك التيار المستمر من نوع التوالى يكاد يكون هو المحرك العام نفسه.

وقد وضعت فى هذا الشكل خواص المحرك التزامنى الذى كان قليل الاستخدام كمحرك يقوم بتشغيل الأحمال الميكانيكية.. وكان يستخدم أكثر بدون حمل ميكانيكي ليقوم بتحسين معامل القدرة.. ولكن استخدامه فى تشغيل الأحمال الميكانيكية زاد فى الآونة الأخيرة بعد ظهور مغيرات التردد لتغيير سرعة هذا المحرك.. حيث يمكن فى هذه الحالة أن يعمل هذا المحرك بأقل تيار (معامل قدرة الوحدة) ويعطى بسهولة أكثر من المحرك التأثيرى قيمة عالية للعزم بالنسبة للتيار.. وبالتالى كفاءة أعلى وقدرة خرج أكبر.. ومن الخواص الهامة للمحركات الكهربية.. قيمة التيار ومعدل تغيره مع تغير الحمل على المحرك. يوضح الشكل رقم (٢) تغير تيار المحرك مع تغير قدرة الحمل على المحرك. وللمقارنة.. اعتبرنا قدرة خرج الحمل الكامل واحدة بقيمة ٥ حصان للأنواع المختلفة. ونلاحظ أن محركات التيار المستمر تأخذ أقل تيار عند اللاحمل .. وبزيادة الحمل يزداد التيار زيادة خطية.. وعند الحمل الكامل يكون التيار أكبر من المحركات الأخرى التأثيرية والتزامنية لأنها تكون ذات ثلاثة أوجه ـ حيث تنقسم القدرة على الأوجه الثلاثة ـ والمحركات التزامنية تكون تياراتها منخفضة عندما تعمل فى تشغيل حمل ميكانيكى.. حيث يكون معامل القدرة حول الواحد الصحيح وذلك لزيادة كفاءة المحرك.. أما المحركات التأثيرية فإن تيارها عند اللاحمل يكون كبيراً وذلك لصغر قيمة معامل القدرة.. ثم يتزايد بمعدل بسيط مع زيادة الحمل لزيادة معامل القدرة.

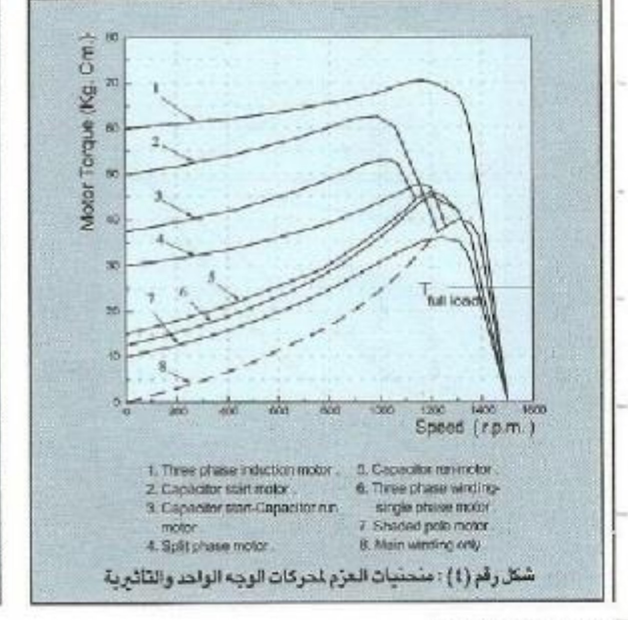
يقع الكثير من المهندسين فى حيرة عندما يجدون تيار هذه المحركات التأثيرية عند اللاحمل كبيراً بحيث يقترب من تيار الحمل الكامل .. وهى خواص طبيعية لهذه المحركات. وسوف نجد أن تيار اللاحمل يتراوح بين ٦٦ـ ٨٦٪ من قيمة تيار الحمل الكامل عندما تكون قدرة المحرك واحد حصان. والنسبة الصغيرة تكون للمحركات ذات السرعة العالية (٢٠٠٠ لفة/ دقيقة) أما النسبة الكبيرة فتكون للمحركات ذات السرعة المنخفضة (١٠٠٠ لفة/دقيقة). وكلما زادت قدرة المحرك عن الواحد حصان كلما انخفضت هذه النسبة حيث تتراوح بين ٣٠ ـ ٥٤٪ عندما تكون قدرة المحرك ٢٥ حصان كما فى الشكل رقم (٣). كما يلاحظ أن نسبة تيار اللاحمل إلى تيار الحمل الكامل تزيد كلما كان وزن حديد الصلب السليكونى ـ وبالتالى وزن أسلاك النحاس ـ فى المحرك قليلاً بالنسبة إلى قدرته وذلك فى التصميمات الحديثة للمحركات حيث يقل وزن المحرك لنفس القدرة .. ويتم ذلك بزيادة درجة التشبع المغناطيسى فى الحديد والذي يتبعه نقص ممانعة المغنطة Magnetising Reactance وبالتالى زيادة تيار اللاحمل. ويمكن الحصول على زيادة درجة التشبع فى التصميمات الحديثة ـ برغم ما يسببه ذلك من زيادة درجة حرارة المحرك ـ باستخدام المواد العازلة الحديثة التى تتحمل درجات الحرارة العالية.

مقارنة بين خواص المحركات التأثيرية ذات الوجه الواحد:

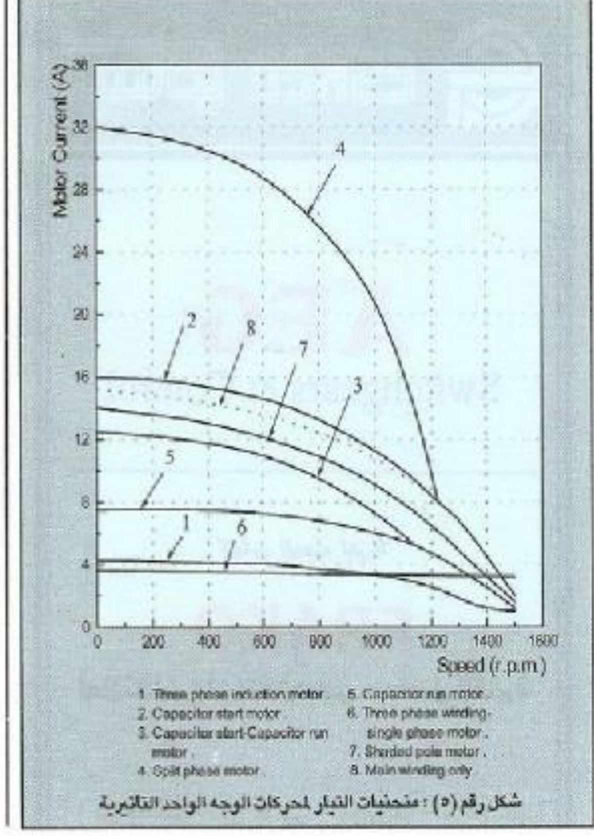
يتم إنتاج المحركات التأثيرية ذات الوجه الواحد بأنواع متعددة.. والاختلاف الرئيسى بينها هو قيمة عزم بدء الحركة. يوضح الشكل رقم (٤) الفروق بين عزوم هذه الأنواع عندما تكون قدرة الحمل الكامل لأى منها مساوية لنصف حصان. وقد تم إضافة منحنى عزم المحرك التأثيرى ثلاثى الأوجه بنفس القدرة (٥ر٠ حصان) وذلك للتأكيد على مزايا المحرك التأثيرى ثلاثى الأوجه عن أى من أنواع المحركات التأثيرية ذات الوجه الواحد. ويتم حالياً فى مصر إنتاج أنواع من هذه المحركات فى عدة مصانع ـ فى القاهرة و٦ أكتوبر و ١٠ رمضان.

وفى الشكل رقم (٤) يعطى المنحنى رقم(١) للمحرك التأثيرى ثلاثى الأوجه أكبر عزم بدء (٦٠ كجم سم).. يليه المحرك "Capacitor Start" ويمثله

⇦



شكل رقم (٤) : منحنيات العزم لمحركات الوجه الواحد والتأثيرية



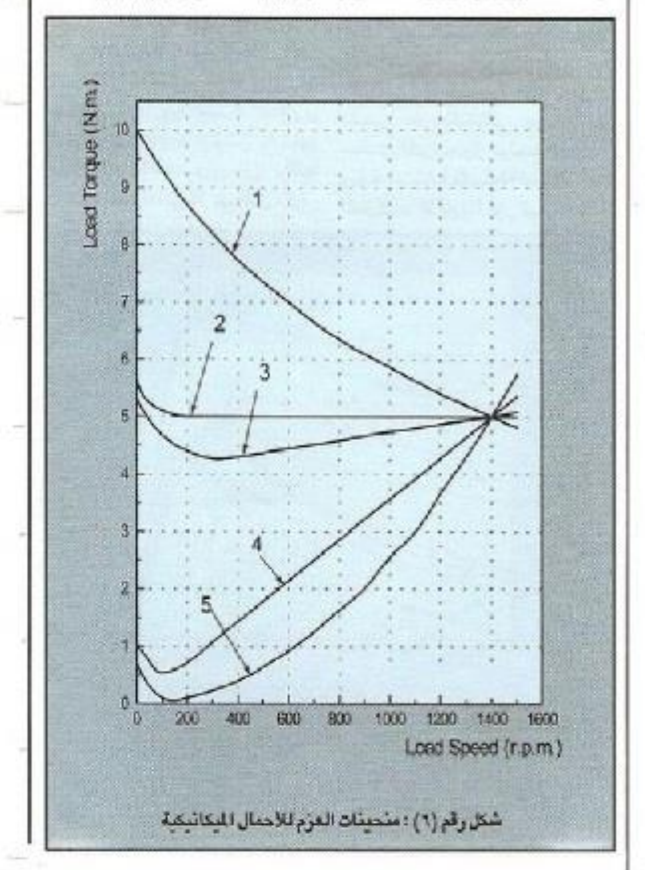
شكل رقم (٥) : منحنيات التيار لمحركات الوجه الواحد التأثيرية

المنحنى رقم (٢) ويعطى عزم بدء (٥٠ كجم سم) ويستخدم فيه مكثف فى حدود ٤٥ ميكروفاراد.. أما المحرك "Capacitor Start - Capacitor Run" فهو يعطى عزم بدء (٥ر٣٧ كجم سم) كما فى المنحنى رقم (٣) ويستخدم فيه مكثفان أحدهما ١٢ ميكروفاراد دائم التوصيل والثاني ٢٠ ميكروفاراد ويوصل عند البدء فقط.. أما المحرك رقم (٤) فهو من نوع "Split Phase" وعزم البدء له فى حدود (٣٠ كجم سم).. والمحرك رقم (٥) من نوع "Capacitor Run" ويعطى عزم بدء فى حدود (١٥ كجم سم) ويستخدم فيه مكثف ١٢ ميكروفاراد موصل باستمرار.. والمحرك رقم (٦) من الأنواع الحديثة ويستخدم فى الغسالات الأوتوماتيكية ويتميز بتحمله لتكرار عمليات البدء Multy Starting وعزم بدء الدوران له يكون منخفضاً عن الأنواع الخمسة السابقة.. ولكن هذه النسبة الصغيرة للعزم تكون مناسبة للحمل لأن المحرك تكون سرعته منخفضة (نحو ٥٠٠ أو ٣٧٥ لفة/ دقيقة) وبالتالى تكون العزوم عالية مع هذه السرعة المنخفضة. وملفات هذا المحرك تكون مقسمة إلى ثلاث مجموعات بنفس تقسيم ملفات المحركات ثلاثية الأوجه.. لذلك يطلق على هذا المحرك "3 - Phase Winding - Single Phase Motor". أما المحرك رقم (٧) "Shaded Pole" فهو أقل المحركات فى عزم البدء حيث يكون فى حدود (٥ر١٢ كجم سم) ويمثل المنحنى رقم (٨) عزم المحرك عندما تكون ملفات بدء الدوران مفصولة وملفات الدوران فقط هى الموصلة بالمصدر حيث يكون عزم بدء الدوران للمحرك صفراً ولا يستطيع المحرك أن يبدأ دورانه.

يوضح الجدول رقم (١) نسبة عزم بدء الدوران إلى عزم الحمل الكامل للأنواع المختلفة من محركات الوجه الواحد ويمكن ملاحظة المزيد من الفروق الجوهرية بين الأنواع المختلفة للمحركات التأثيرية ذات الوجه الواحد مقارنة بالمحرك التأثيرى ثلاثى الأوجه فى الشكل رقم (٥) الذى يبين تغير التيار مع تغير السرعة خلال فترة بدء الدوران Run Up. وفى هذا الشكل نجد أن المحرك التأثيرى ذا الثلاثة أوجه يكون تياره منخفضاً خلال فترة البدء كما يكون تياره أقل تيار (٢ر١ أمبير) عند الحمل الكامل (عند سرعة ١٤٠٠ لفة/ دقيقة).

كما يلاحظ أن المحرك رقم (٦) الذى يستخدم فى الغسالات الأوتوماتيكية يكون تياره لحظة البدء أقل تيار وتبقى قيمته ثابتة تقريباً مع زيادة السرعة لكى يتحمل تكرار البدء. ويلاحظ أن هذا المحرك لا تحترق ملفاته إذا كان الحمل كبيراً وظل ساكناً.. أو تم إيقافه بأية وسيلة مع توصيله إلى المصدر الكهربى. ويرجع ذلك إلى هذا الشكل للتيار الذى يكون ثابتاً تقريباً مع تغير السرعة عندما تكون الغسالة تعمل فى برامج الغسيل.. أما إذا كانت الغسالة تعمل فى برنامج العصر Spinning فإن ملفات المحرك فى هذه الحالة — والتى تكون منفصلة عن ملفات حالة الغسيل - تكون بنفس خواص المحرك رقم (٥) "Capacitor Run" وهى لا تتحمل بقاء المحرك ساكناً إلا لفترة البدء الصغيرة المعتادة.. لأن البدء (٥ر٧ أمبير) يكون أعلى من تيار الحمل الكامل المصممة عليه هذه الملفات =٥ر٢ أمبير- ويكون تيار البدء – ٥ر١٢ أمبير- أعلى فى المحرك رقم (٣) ويليه المحرك رقم (٤) –١٤ أمبير- ثم المحرك رقم (٨) –٢ر١٥ أمبير- ثم المحرك رقم (٣) –١٦ أمبير-. أما المحرك رقم (٤) فيستحق التأمل لأنه يأخذ أكبر تيار بدء –٣٢ أمبير.. يصل إلى ضعف تيار المحرك رقم (٢) على الرغم من أن المحرك رقم (٣) عزم بدئه –٥٠ كجم سم.. أعلى من المحرك رقم (٤) والذى يبلغ ٣٠ كجم سم- وذلك لتأثير المكثف الذى يؤدى إلى تحسين معامل القدرة وزيادة العزوم وزيادة نسبة Torque) /Ampere). ورغم هذا العيب الكبير (تيار البدء العالى) للمحرك رقم (٤) والذى يجعله لا يتحمل تكرار البدء فى زمن محدود - وكثيراً ما تحترق ملفات البدء فيه - إلا أن المصانع تنتجه بمعدل كبير وذلك لقلة تكاليف تصنيعه عن الأنواع الأخرى من هذه المجموعة من المحركات.

ويلاحظ أن تيار المحرك رقم (٤) وتيار المحرك رقم (٢) يكونان متساويين عند الحمل الكامل لأن أياً منهما يتم فصل ملفات البدء له عند سرعته العالية ويعمل فقط على ملفات الدوران ولهذا فإن منحنيات هذين المحركين تشترك مع منحنى المحرك رقم (٨) فى الشكلين رقمى (٤) (٥) فى السرعات العالية بعد فصل ملفات البدء.. وكذلك المحرك رقم (٣) — بعد فصل مكثف البدء (٢٠ ميكروفاراد) فى السرعات العالية - فإن منحنيات التيار والعزم له تقع على نفس منحنيات التيار والعزم للمحرك رقم (٥) - شكلى رقم (٤)، (٥)



شكل رقم (٦) : منحنيات العزم للأحمال الميكانيكية

٦ـ منحنيات الأداء للحمل الميكانيكي

يعتبر العزم مع السرعة للحمل الميكانيكي عاملاً أساسياً فى اختيار المحرك المناسب لهذا الحمل. فإذا كان الحمل يحتاج إلى عزم عال عند البدء، فإن المحرك يجب أن يكون ذا عزم بدء عال. أما إذا كان عزم المحرك أقل من عزم الحمل عند البدء فلن يتمكن المحرك من الدوران وسوف يبقى ساكناً. أما السرعة التى يدور بها المحرك مع الحمل بصورة مستقرة. فهى السرعة التى يكون عندها عزم المحرك مساوياً لعزم الحمل.. التى عندها يتقاطع منحنى عزم المحرك ومنحنى عزم الحمل.

يوضح الشكل رقم (٦) منحنيات أنواع مختلفة من الحمل الميكانيكى وكذلك قيمة العزم اللازم للحمل عند كل سرعة. وللمقارنة.. تم اختيار قيمة لعزم الحمل مقدارها (٥ نيوتن متر) وهى نفس القيمة للأنواع المختلفة عند سرعة الدوران المستقرة (١٤٠٠ لفة/ دقيقة). يمثل المنحنى رقم (١) الحمل الذى يحتاج لأكبر عزم بدء وأكبر عزوم فى السرعات المنخفضة.. وكلما زادت السرعة نقص العزم الذى يحتاجه الحمل. ونجد أن العزم يتناسب عكسياً مع السرعة.. أى تكون قدرة الحمل ثابتة مع تغير السرعة. وهذا النوع من الأحمال مثل المخارط وآلات قطع المعادن وماكينات التفريز وماكينات التقشير وماكينات لف الرقائق. ويمثل المنحنى رقم (٢) الحمل الذى يكون عزمه ثابتاً مهما تغيرت السرعة مثل الروافع والأوناش والمصاعد وسيور النقل وماكينات البثق والطلمبات ذات المكبس. أما المنحنى رقم (٣) فهو يمثل حمل الجر مثل الترام والمترو ووسائل النقل. ويمثل المنحنى رقم (٤) حملاً يزيد عزمه بزيادة السرعة زيادة خطية وهو يمثل المولدات الكهربية ذات التغذية الخارجية. أما المنحنى رقم (٥) فيمثل حملاً يتزايد عزمه مع مربع السرعة.. وهو حمل مشهور باسم Fan Load ويمثل المراوح الهوائية بأنواعها وطلمبات الطرد المركزى والسفن. وهذه المنحنيات يمكن القياس عليها واستنتاج شكل منحنى اى نوع آخر من الأحمال لتحديد المحرك الكهربى المناسب لتشغيلها.

ويلاحظ أن بعض أنواع الأحمال الميكانيكية تتغير فيها قيمة العزم ليس بتغير السرعة فقط.. ولكن أيضاً يتغير العزم مع مرور الوقت منذ بدء تشغيل الحمل.. مثل ضواغط الهواء ذات المكبس مع خزان للهواء وكذلك أجهزة التكييف والثلاجات الكهربية حيث يظل عزم الحمل عند البدء ثابتاً مع زيادة

جدول رقم (١): نسبة عزم البدء إلى عزم الحمل الكامل

Motor Type	Starting/ Full Load Torque
Split Phase	1.2
Capacitor Start - Capacitor Run	1.5
Shaded Pole	0.4
3 Phase Motor	2.4
Capacitor Start	2
Capacitor Run	0.6
3 Phase Winding - Single Phase Motor	0.5

جدول رقم (٢): نسبة تيار البدء إلى تيار الحمل الكامل

Motor Type	Starting/ Full Load Current
Split Phase	7.1
Capacitor Start - Capacitor Run	5
Shaded Pole	4.35
3 Phase Motor	3.6
Capacitor Start	3.55
Capacitor Run	3
3 Phase Winding - Single Phase Motor	1.12

السرعة وبعد ثبات السرعة وكلما مر الوقت يزداد الضغط وبالتالى يزداد العزم مع الزمن . ولهذا.. فإن فصل المحرك الكهربى فى هذه الحالات ثم إعادة تشغيله يجعل المحرك غير قادر على البدء والدوران ويجب خفض الضغط فى خزان الهواء أو الانتظار قليلاً فى حالة أجهزة التكييف والثلاجات حتى ينساب غاز الفريون إلى مواسير الضغط المنخفض.

ويلاحظ أن هذه الظاهرة تحدث إذا تم فصل اى جهاز تكييف أو ثلاجه إذا كان المحرك دائراً وتم إعادة تشغيله بعد وقت قصير.. وكذلك إذا استخدمت أجهزة مثبتات الجهد ذات المرحل Re-lay Type Stablizers. وعندما لا يستطيع المحرك الدوران فإن تياره يكون عالياً ومساوياً لتيار البدء ولا يتحمله المحرك.. ويقوم جهاز حماية المحرك Over Load بفصل المحرك.. ولكن تكرار هذه العملية يؤدى إلى تحميص عوازل المحرك وضعفها واحتراق المحرك. وتقع نفس المشكلة لأجهزة التكييف والثلاجات إذا استخدم مولد احتياطى يعمل أوتوماتيكيا عند انقطاع التيار ويكون مضبوطاً بحيث يشغل الأحمال بعد زمن قليل من انقطاع التيار . ويجب أن يضبط الزمن لإعادة توصيل التيار بحيث يكون كافيا ـ على الأقل ١٥ دقيقة ـ حتى نضمن سلامة مثل هذه المعدات.

التعرف على المحركات مجهولة البيانات

د. فتحـى عبـد القـادر
أستاذ الآلات الكهربية ـ هندسة شبين الكوم

عندما نجـد محركًا كهربيًا لا تـوجد عليه أية بيانات.. أو نـريد أن نتأكد من أن البيانات الموجودة على محرك ما هى بيانـات صحيحة.. فإننـا نحتاج إلى أن نتعرف على نوعية هذا المحرك وأطراف تـوصيله والجهـد المنـاسب لتشغيلـه وتيـار الحمل الكـامـل وقـدرة الدخـل والخرج والكفـاءة والسرعـة ومعـامـل القدرة عند الحمل الكـامل ورتبة المواد العازلة ودرجة الحماية.

وســـوف نتنــاول التعـــرف على المحـركات ثـلاثيـة الأوجـه من النـوع التأثيرى Three Phase Induction Motors... كما يلى:

١. التعرف على أطراف توصيل المحرك

إذا كانـت «روزتة» توصيـل أطراف المحـرك المعتادة غير مـوجودة.. أو تـم إعـادة لـف المحرك وحـدث شـك فى أن بدايـات ونهايات ملفـات الثلاثـة أوجه موصلة بطـريقة خطأ.. فإننـا نستطيع التعـرف على بدايـات ونهايات ملفـات الثلاثـة أوجه حيـث نبدأ بـالتعرف على طـرفى كـل وجـه بـاستخـدام جهـاز «أوميتر» أو «أفوميتر» أو لمبة اختبار أو أية طريقة أخـرى.. وبهذا يصبح لدينا ستة أطراف كل اثنين منها يمثلان أحد الأوجـه. ولكن هـذا لا يكفـى.. إذ يجب تحديـد بـدايـة ونهايـة كـل وجـه لأن المحرك إذا كان سيوصل «نجمة» Star مثلاً فإن بدايات الأوجـه الثلاثة توصل مـع بعضهـا.. بينما تـوصـل نهايـات الأوجـه بـالمنبع. ولا يجب أن يـوصـل بـالمنبع نهايـة وجهين وبدايـة الوجـه الثـالث مثـلاً.. وإنما يجب أن يوصـل بالمنبـع نهايات أو بدايـات ثلاثـة حتى ينشأ مجال مغناطيسـى دائرى منتظم Circular Rotating Field. وإذا كان المحرك سيوصـل «دلتا» Delta فيجب أيضًا أن نتقيـد فى التوصيل بالبـدايات والنهايـات. ويلاحظ أن تعبير بـدايات الأوجه أو نهاياتها هو تعبير يمكننا من تعريف الأطراف الثلاثة المتناظرة والتى تؤدى إلى تـوزيع الملفات بحيـث يكون بينها زاوية ١٢٠° فى الفـراغ. ويمكن أن نسمى ثـلاثة أطراف البدايـات أطراف نهايـات أو العكـس. ولكـن إذا تمت تسميـة بدايـة وجه مـا فإنـه يجب أن تحدد بداية الوجه الثـانى والثالث بناءً على هذه التسـمية.

ولمعرفة الأطراف المتشابهة للأوجه ـ بدايات ونهايات ـ نقـوم بتوصيل طرف أحد الأوجـه وليكن الـوجه A إلى منبـع تيـار متغير ذى جهد حـوالى ١٠٪ من جهد الوجه للمحـرك بعد أن يوصل أى من طـرفى الوجـه B إلى أى مـن طـرفى الوجه C.. ونوصـل جهاز «فـولتميتر» بين الطـرف البـاقـى مـن الـوجـه B والطرف الباقى من الوجه C . فإذا قرأ جهاز «الفولتميتر» جهـدًا صغيرًا جدًا ـ حوالى الصفر ــ كان توصيل الـوجه B مع الـوجه C صـحيحًـا.. ويكـون هـذا التوصيـل كما فى الشـكل رقـم (١). أما إذا قرأ جهاز «الفـولتميتر» جهدًا يقترب من جهد الوجه A.. كان التوصيل خطأ ويعبر عنه الشكل رقـم (٢) حيث يجب تبديل طـرفى الوجه B أو C. وبتكرار هذه التجـربة مع تغـذية الـوجه B من المنبع وتوصيل الوجه C مع الوجه A مع «الفـولتميتر» نتعـرف على الأطـراف المتشابهة للثلاثة أوجه.

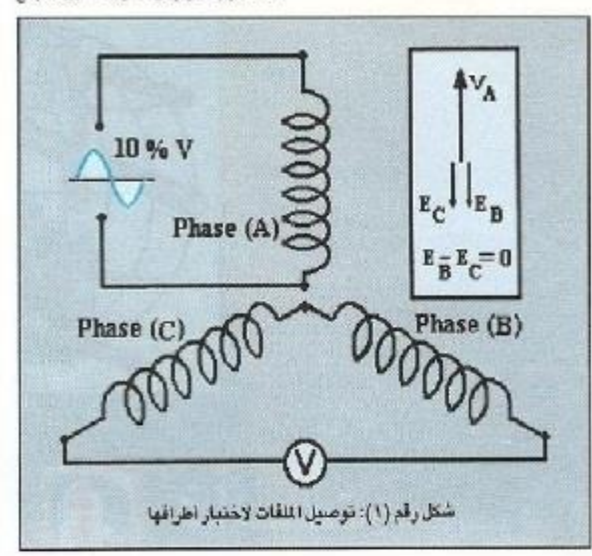
ونـلاحـظ أن السبـب فى قـراءة «الفـولتميتر» لقيمة «صفـر» فى حالـة التوصيـل الصحيح.. يرجـع إلى أن كلاً من الوجهين B وC تستنتج بهما قـوة دافعة كهربية EB وEC متساويـة وفى اتجاه زمنى ضد اتجاه جهـد المنبع VA كما هـو مبين بـالـرسـم الاتجاهـى فى الشكـل رقـم (١).. وتكـون قـراءة «الفولتميتر» هـى الفرق بين EB وEC وتساوى «صفر».

أما التـوصيل المبين فى الشكـل رقم (٢) فيجعـل قراءة «الفـولتميتر» هـى مجموع EB وEC ويقترب من قيمة VA كما هـو مبين بـالـرسـم الاتجاهـى فى الشكل رقم (٢). وبمعنـى آخر.. يمكن القـول بأن تـوصيل الـوجهين B وC بالطـريقة المبينـة فى الشكل رقـم (١) يجعلهما يمثلان ملفًا متعامدًا فى الفراغ على الوجه A. ولهذا تكون القوة الدافعة الكهربيـة المستنتجة بـه «صفر». أمـا التوصيل المبين فى الشكل رقم (٢) فإنه يجعل الوجهين B وC يمثلان ملفًـا فى نفس اتجاه الوجه A فى الفراغ.. فتكون القـوة الدافعـة الكهـربيـة به تسـاوى تقريبًا قيمة VA.

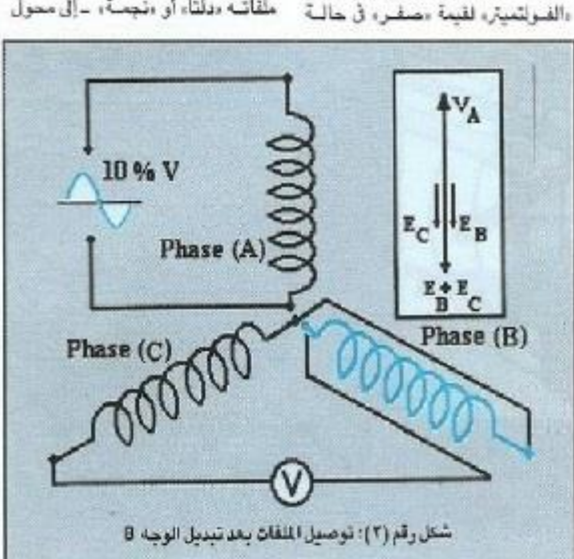
٢. التعرف على جهد التشغيل Rated Voltage

للتعـرف على الجهـد الـذى يجب أن يعمـل عليه المحـرك التـأثيرى ثلاثـى الأوجه.. نـأخذ أولاً المحـرك من النـوع ذى العضـو الـدائر الملفـوف Wound Rotor .. ونفصل أطراف العضو الدائر ليكون مفتـوحًا Open Circuit .. ثـم نوصـل العضو الثابـت ـ سواءً كـانت ملفاتـه «دلتا» أو «نجمـة» ـ إلى محول





شكل رقم (١): توصيل الملفات لاختبار أطرافها



شكل رقم (٢): توصيل الملفات بعد تبديل الوجه B

متغير ثلاثي الأجه Three Phase Variac مع توصيل «فولتميتر» و«أميرومتر» في الخط للمحرك كما في الشكل رقم (٣).. **ثم نبدأ بجعل الجهد** المسلط على المحرك صغيرًا ونسجل قراءتي «الأميرومتر» و«الفولتميتر» ..ثم نزيد الجهد عدة مرات بالتدريج وفي كل مرة نسجل قراءتي «الأميروميتر» و«الفولتميتر».. ونلاحظ أن المحرك لن يدور ويعتبر عند اللاحمل. ومن هذه النتائج نرسم العلاقة بين التيار والجهد والذي يجب أن يأخذ الشكل رقم (٤). ونجد أن التيار يزداد خطيًا بزيادة الجهد عند الجهود المنخفضة ثم يزداد بمعدل أكبر وبشكل منحنى في الجهود الأعلى وذلك لتشبع الحديد في المحرك. أما زيادة الجهد أعلى من ذلك فتؤدي إلى زيادة التيار بمعدل كبير جدًا الأمر الذي يمثل خطورة على المحرك إذا استمر زمنًا طويلاً ويأخذ شكلاً خطيًا لتمام تشبع الحديد. ويمثل شكل هذه العلاقة جزأين مستقيمين بينهما جزء منحنى - أي يمثل ركبة Knee - ويكون الجهد المناسب للتشغيل هو الجهد المقابل لمنتصف الركبة أو أعلى منه قليلاً حسب درجة تبريد المحرك وذلك كما في الشكل رقم (٤).

ويلاحظ أنه إذا تم زيادة الجهد بالتدريج حتى أعلى قيمة ممكنة من المحول المتغير Variac وكانت علاقة التيار مع الجهد خطية وليس بها جزء منحنى في النهاية.. فإن هذا يعني أن جهد تشغيل المحرك أكبر من أعلى قيمة حصلنا عليها من المحول المتغير Vari- ac ويجب استخدام جهد أعلى من ذلك في هذه التجربة. أما إذا زاد التيار وبمعدل كبير في الجهود المنخفضة.. فإن هذا يعني أن جهد تشغيل المحرك منخفض ويجب زيادته من البداية بمعدلات صغيرة حتى نحصل على شكل الركبة للعلاقة بين التيار مع الجهد. وهكذا ..نكون قد تعرفنا على الجهد المناسب لتشغيل المحرك وكذلك قيمة تيار اللاحمل.

ونلاحظ أن نفس التجربة ونفس النتائج يمكن إجراؤها للمحولات ذات الثلاثة أوجه أو ذات الوجه الواحد .. حيث نجعل المحول بدون حمل ونحصل على الجهد المناسب لتشغيله ونتعرف أيضا على تيار اللاحمل.

أما المحرك التأثيري ثلاثي الأوجه من نوع قفص السنجاب Squirrel Cage فإننا لا نستطيع فصل الدائرة الكهربية للعضو الدائر ونقوم بتوصيل العضو الثابت بنفس الأسلوب إلى «المحول المتغير».. ولكن نلاحظ أن المحرك سوف يدور.. ولا يجب أخذ قراءات «الأميرومتر» و«الفولتميتر» إلا **عندما تصل سرعة المحرك إلى أعلى قيمة** ممكنة ثم نزيد الجهد عن ذلك قليلاً ونبدأ في تسجيل قراءات الأجهزة بداية من الجهد العالي ثم تخفض الجهد بالتدريج ونسجل القراءات هبوطًا بالجهد- وليس صعودًا حتى تبقى السرعة ثابتة تقريباً. وفي هذه الحالة تختلف العلاقة بين التيار والجهد عن حالة المحرك ذي العضو الدائر الملفوف حيث نجد أن التيار في منطقة الجهود المنخفضة يكون عالياً بسبب انخفاض السرعة ثم ينخفض بزيادة الجهد ويدخل في منطقة الجزء المنحنى الدالة على تشبع الحديد ثم منطقة الخط المستقيم الدالة على تمام التشبع. ومن هذا الشكل للعلاقة بين التيار والجهد.. نستطيع تحديد الجهد المناسب لتشغيل المحرك حيث يكون في حوالي منتصف منطقة الجزء المنحنى - شكل رقم (٤).



شكل رقم (٣): توصيل المحرك با المحول المتغير وأجهزة القياس

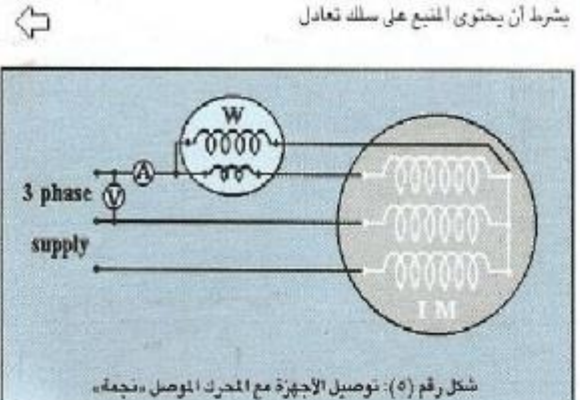
٣- التعرف على بيانات الحمل الكامل

للتعرف على بيانات الحمل الكامل..نحتاج لقياس قدرة الدخل للمحرك.. وسوف نستخدم جهاز «واتميتر» واحد- بدلاً من جهازين أو ثلاثة بالطرق التقليدية — وجهاز «فولتميتر» وجهاز «أميروميتر». ويستخدم «الواتميتر» لقياس قدرة الدخل ثلاثية الأوجه للمحرك.. حيث يوصل ليقيس قدرة الدخل لوجه واحد ونضرب قراءته في ثلاثة لنحصل على قدرة الدخل الكلية. ويتوقف توصيل «الواتميتر» بالمحرك على ما إذا كان موصلاً «نجمة» أو «دلتا». فإذا كان المحرك موصلاً «نجمة» فيوصل «الواتميتر» بحيث يمر في ملف تياره تيار وجه وليكن الوجه A. ويوصل ملف الجهد إلى جهد نفس الوجه A حيث يوصل أحد طرفي ملف الجهد بنفس الطرف الموصل لملف التيار والطرف الثاني إلى نقطة التعادل Neu- tral للمحرك أو للمنبع ويوصل جهازا «الفولتميتر» و«الأميروميتر» -شكل رقم (٥). أما إذا كان المحرك موصلاً «دلتا» فيجب فتح أحد أوجه المحرك وتوصيل ملف التيار «للواتميتر» به وتوصيل ملف الجهد وجهازي «الفولتميتر» و«الأميروميتر» - شكل رقم (٦) - أو توصيل «الفولتميتر» والأجهزة - شكل رقم (٧) - سواء كان المحرك موصلاً «نجمة» أو «دلتا» بشرط أن يحتوي المنبع على سلك تعادل Neutral. وفي جميع الحالات نضرب قراءة «الواتميتر» في ثلاثة لنحصل على قدرة الدخل الكلية.

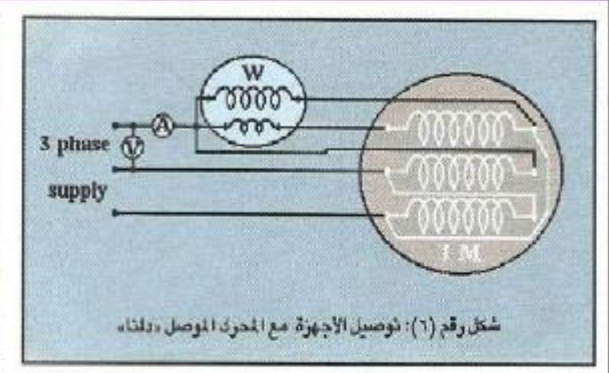
ويلاحظ أن جهد المنبع في أي حالة يكون هو الجهد الذي سبق التعرف عليه في البند السابق. وقبل توصيل المحرك بالمنبع نقيس المقاومة بين أي طرفين من أطراف المحرك التي ستوصل للمنبع وتكون هي Ra عند درجة حرارة الوسط θa .. ثم نقوم بتشغيل المحرك وهو بدون حمل ونسجل قراءة «الواتميتر» ونضربها في ثلاثة لتكون القدرة عند اللاحمل Po .. ونسجل قراءة «الأميرومتر» ونحدد منها قيمة تيار اللاحمل للوجه ليكون Io.. ثم نقوم بتحميل المحرك بأي حمل لفترة بسيطة ثم نفصله وعلى الفور نقيس المقاومة بين الطرفين والتي زادت من Ra إلى Rb ..ونحسب ارتفاع درجة حرارة المحرك خلال فترة تشغيل الحمل هذه باستخدام العلاقة الرياضية الموضحة في صفحة ٢٧ بالعدد رقم ٥٢ «الكهرباء العربية». فإذا كانت درجة الحرارة قد ارتفعت بدرجة منخفضة دل ذلك على أن هذا الحمل منخفض ..أما إذا كانت درجة الحرارة عالية دل ذلك على أن الحمل كبير. وهكذا.. يمكن تحميل المحرك بحمل يجعل الزيادة في درجة الحرارة في حدود ٨٠ْ م عندما تكون المواد العازلة من النوع Class b وهي المستخدمة بكثرة في الوقت الحاضر في المحركات

⇦

شكل رقم (٤): تغير تيار المحرك عند اللاحمل مع تغير الجهد



شكل رقم (٥): توصيل الأجهزة مع المحرك الموصل «نجمة»



شكل رقم (٦): توصيل الأجهزة مع المحرك الموصل «دلتا»

شكل رقم (٧): توصيل الأجهزة مع المحرك الموصل «نجمة» أو «دلتا»

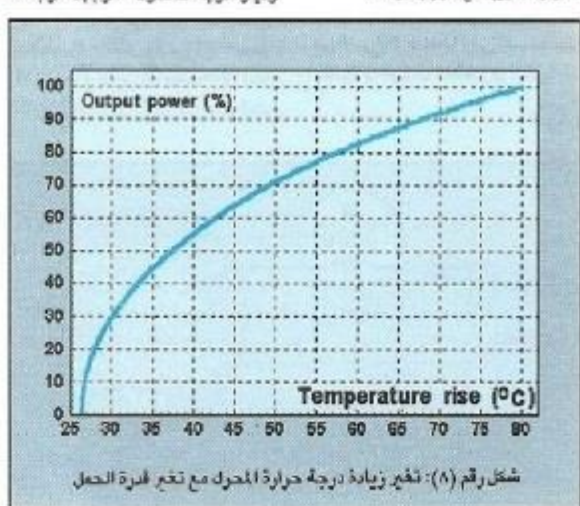


الصغيرة والمتوسطة القدرة. أما المحركات كبيرة القدرة أو المحركات ذات الاستخدام الخاص فتستخدم فيها مواد عازلة تتحمل أكثر من ذلك كما هو مبين في العدد رقم ٥٢.

ويلاحظ.. أنه يمكن الاستدلال على نوع المواد العازلة عندما ترتفع درجة حرارة المحرك وتظهر رائحة العازل حيث يدل ذلك على أن درجة الحرارة هذه والتي يمكن قياسها هي أعلى قليلاً من أقصى درجة حرارة تتحملها هذه المواد العازلة. ولا يجب أن تظهر هذه الرائحة بدرجة قوية أو لفترة طويلة لأن هذا يعني إحداث إجهادات على المواد العازلة تؤدي إلى إضعافها خصوصاً في اختبارات قياس العزل باستخدام الجهد العالي.

كما يجب ملاحظة أن أقصى درجة حرارة يصل إليها المحرك تكون بعد فترة تشغيل بالحمل لمدة لا تقل عن ساعة للمحركات الأقل من واحد حصان.. أما المحركات الأكبر من ذلك فيجب أن يستمر زمن اختبار درجة الحرارة أكثر من ساعة حسب قدرة المحرك. ويحدد هذا الزمن ثبات درجة الحرارة تقريباً مع مرور الوقت.

وهكذا.. بزيادة الحمل تدريجيا حتى تصل درجة الحرارة إلى أقصى قيمة تتحملها المواد العازلة.. يمكن معرفة قيمة الحمل الكامل. أما إذا كانت الإمكانيات لا تسمح بتغيير الحمل على المحرك بسهولة وتم تحميل المحرك بحمل ثابت القيمة ووصلت درجة حرارته مع هذا الحمل إلى أقل من أقصى درجة حرارة يمكن أن تتحملها المواد العازلة.. فإنه يمكن معرفة قيمة الحمل الكامل لهذا المحرك من الشكل رقم (٨) والذي تم استنتاجه نظرياً وعملياً خصيصاً لهذا المقال. ونجد أن المحرك إذا كان يعمل بدون حمل فإن حرارته تزداد بحوالي ٢٦°م وإذا كان محملا بحيث تصل الزيادة في درجة الحرارة إلى ٤٠°م ـــ كمثال ـــ فإن ذلك يعني أن هذا الحمل يناظر ٧٢٪ من قيمة الحمل الكامل وبالتالي يمكن التعرف على قيمة الحمل الكامل لهذا المحرك عندما تكون المواد العازلة من نوع Class B حيث تكون أقصى زيادة مسموحة في درجة الحرارة ٨٠°م وذلك من الشكل رقم (٨). وعندما يتم تحميل المحرك بالحمل الكامل حيث ترتفع درجة الحرارة إلى أقصى قيمة آمنة فإنه يمكن من قراءات أجهزة القياس معرفة قدرة الدخل عند الحمل الكامل P_{in} وتيار الوجه للمحرك I وجهد الوجه V



شكل رقم (٨): تغير زيادة درجة حرارة المحرك مع تغير قدرة الحمل

وسرعة المحرك n وكذلك مقاومة الوجه R.

ومن نتائج القياس عند اللاحمل.. يمكن حساب مفاقيد الحديد P_i حيث..

$$P_i = P_o - 3I_o^2R$$

وتكون القدرة الكهربية في الثغرة الهوائية P_g:

$$P_g = P_{in} - P_i - 3I^2R$$

ومن ثم: يكون عزم المحرك عند الحمل الكامل T:

$$T = 60\,P_g / (2\pi n_s)$$

حيث n_s هي سرعة التزامن.

وتكون قدرة الخرج للمحرك عند الحمل الكامل: $P_{out} = 2\pi T n / 60$

وتكون كفاءة المحرك η عند الحمل الكامل هي: $\eta = P_{out} / P_{in}$

أما معامل القدرة عند الحمل الكامل فيكون: $pf = P_{in} / 3VI$

وأخيراً.. فإنه يمكن التعرف على درجة الحماية للمحرك من شكل جسم المحرك من حيث احتوائه على فتحات تهوية وموقع وحجم هذه الفتحات.. وما إذا كان مغلقا تماماً بدون جوانات أو به جوانات كاوتش حول عمود الدوران وصندوق الأطراف لمنع تسرب المياه أو الغبار الدقيق إلى داخل المحرك.. من شكل هذا الجسم يمكن التعرف على درجة حماية المحرك (IP) وذلك وفقاً لما جاء بالدراسة السابقة في العدد رقم ٥٢ «الكهرباء العربية».

التحكم فى سرعة المحركات الكهربية

١ - محركــات التيــار المستمــر

د. فتحي عبد القادر
أستاذ الآلات الكهربية - هندسة شبين الكوم

تصنع المحركات الكهربية لتعمل عند سرعة دوران معينة تسمى بالسرعة المقننة Rated Speed .. إلا أن العديد من الأحمال الميكانيكية تحتاج للعمل عند سرعات متعددة - تختلف قيمتها وعددها والمدى الذى تتغير فيه حسب طبيعة الحمل ـــ كما أن هناك أحمال تتطلب الاحتفاظ بالسرعة عند القيمة المضبوطة عليها دون أى تغير إذا تغير عزم الحمل.. وأحمال لا يضيرها تغير السرعة بعض الشيء.

وليس هناك أى محرك كهربى يستطيع تلبية احتياجات تغيير سرعة الأحمال المختلفة إلا باستخدام وسيلة ما لتغيير السرعة. ولكى يتم التحكم فى السرعة بطريقة شبه مثالية يجب توفر الشروط التالية:

١ - اتساع مدى تغير السرعة .. مثلاً من ١٠٠ - ١٠٠٠٠٠ لفة / دقيقة.

٢ - التحكم فى السرعة بحساسية عالية .. كأن يكون المحرك يدور بسرعة ١١٠١ لفة / دقيقة بينما السرعة المطلوبة ١١٠٢ لفة / دقيقة .

٣ - احتفاظ السرعة بالقيمة المضبوطة عليها مهما تغير عزم الحمل.

٤ - بقاء معدل تغير سرعة المحرك مع العزم dN/dT بحالته الجيدة عند أقل قيمة ممكنة حتى يساعد فى تحقيق الشرط السابق.. لأن بعض الطرق تزيد هذا المعدل مما يؤدى إلى تغير كبير فى السرعة مع تغير عزم الحمل.

٥ - عدم إنقاص العزوم الطبيعية لبدء الحركة والعزم الأقصى للمحرك قبل استخدام وسيلة تغيير السرعة.

٦ - عدم إنقاص كفاءة المحرك نتيجة لزيادة المفاقيد مما يضطرنا لإنقاص قيمة قدرة الحمل الكامل للمحرك Power Derating.

٧ - أقل قيمة ممكنة للقدرة المستهلكة فى وسيلة التحكم فى السرعة .

٨ ـــ أقل قيمة ممكنة لثمن وسيلة التحكم فى السرعة .

٩ - أقل قيمة ممكنة لتكاليف الصيانة لوسيلة التحكم فى السرعة .

وهذه الشروط يجب دراستها بعناية عند اختيار نوع المحرك الكهربى ونوع وسيلة تغيير السرعة التى تناسب الحمل الذى يحتاج إلى تغيير السرعة.

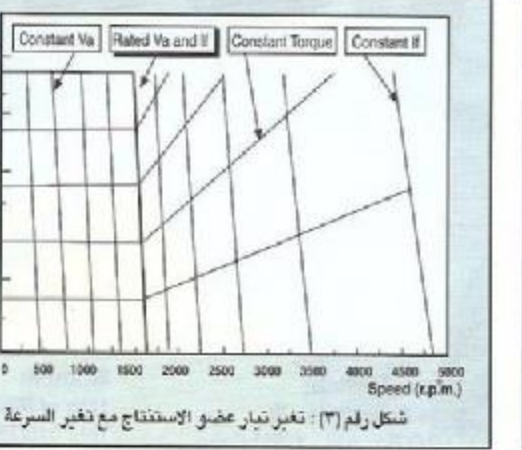
وسوف نتناول أهم الطرق المستخدمة فى تغيير سرعة المحركات الكهربية..

١ - محركات التيار المستمر

برغم وجود مشاكل عضو التوحيد Commutator وارتفاع ثمن محركات التيار المستمر عن محركات التيار المتردد.. إلا أن محركات التيار المستمر مازالت حتى الآن تفضل على محركات التيار المتردد عندما يحتاج الحمل لمدى واسع فى تغيير السرعة لما تتميز به من رخص ثمن وسيلة التحكم فى السرعة والمحافظة على خواص المحرك بحالتها الجيدة من عزم بدء عالٍ وكفاءة عالية وقيمة صغيرة لمعدل تغير السرعة مع العزم وإمكانية تحميل المحرك بكامل قدرة الحمل الكامل.. وذلك على عكس ما يحدث مع محركات التيار المتردد حيث تكون وسيلة التحكم فى السرعة غالية الثمن وتصل إلى أضعاف ثمن المحرك.. كما أن عزوم المحرك وكفاءته تنخفض ولا نستطيع تحميل المحرك بحمله الكامل.. كما يظهر الأثر الضار للتوافقيات Harmonics على كل من المحرك والشبكة الكهربية.

شكل رقم (١): توصيل محرك تيار مستمر تغذية منفصلة إلى منبع ثلاثى الأوجه

وللتحكم فى سرعة محركات التيار المستمر خلال المدى الواسع لتغير السرعة.. تستخدم الطرق الحديثة قنطرة توحيد محكومة "بالثايرستور" فى دائرة المجال وقنطرة أخرى فى دائرة عضو الاستنتاج Armature حيث أن المنبع المتاح يكون عادة منبع تيار متردد ويكون المحرك فى هذه الحالة من نوع التغذية المنفصلة Separate Excited وبحيث يتم التحكم فى أى من تيار المجال أو جهد عضو الاستنتاج.. ويمكن استعمال ملفات مجال بالتوالى مع عضو الاستنتاج كمحرك مركب Compound Motor بشرط أن يكون مجالها معاكساً للمجال الرئيسى للأقطاب Differential Compound حتى تساعد فى جعل سرعة المحرك ثابته عند القيمة المضبوطة عليها مهما تغير عزم الحمل.. حيث يكون معدل تغير السرعة مع العزم بأقل قيمة ممكنة عندما يكون التحكم بنظام الحلقة المفتوحة Open Loop . أما إذا كان الحمل فى حاجة لسرعة ثابتة تماماً فإن التحكم يكون بنظام الحلقة المغلقة Closed Loop ـــ وهو أكثر تكلفة - ويكون مجال ملفات التوالى مساعداً للمجال الرئيسى Cumulative Compound مما يزيد من عزم الحمل الكامل للمحرك ويجعله أكثر استجابة للتغير فى عزم الحمل. وهناك فرق كبير بين ملفات التوالى التى توضع على نفس القطب الرئيسى مجاورة للملفات التوازى وملفات الأقطاب المساعدة Inter Poles أو ملفات التعويض Compensated Windings التى توصل بالتوالى مع عضو الاستنتاج وتوضع بين الأقطاب الرئيسية ويكون هدفها



شكل رقم (٣) : تغير تيار عضو الاستنتاج مع تغير السرعة

شكل رقم (٢) : تغير عزوم المحرك والحمل مع تغير السرعة

ملاشاة الشرارة التـي تحدث على عضو التوحيد بسبب مشكلةCommutation

يـوضـح الشكـل رقـم (١) توصيـل محرك تيار مستمـر «تغذيـة منفصلة» من منبع ثـلاثى الأوجه خلال قنطـرتى تـوحيد محكـومتين "بالثـايرستـور" بنظام الحلقـة المفتوحـة Open Loop حيـث يمكـن التحكـم ف تيـار ملفـات المجال If أو التحكـم فى جهـد عضـو الاستنتـاج Va والتحكـم هنـا يتـم بـالتحكـم فى زاويـة إشعـال "الثايـرستور" فى كل مـن القنطرتين.. وهذه هى الطريقـة الشائعة الاستخدام حـالياً بعـد أن كانـت نستخدم قـديما مقاومـات بالتـوالى مع كـل من ملفـات المجـال وعضـو الاستنتـاج وكـان لها عيـوب كثيرة أهمهـا القـدرة الكبيرة المستهلكـة فى القـاومـات وصعـوبـة التحكم الأتوماتيكى فيها وزيادة معدل تغير السرعة مع العـزم .. كما يستخدم فى الوقـت الحاضر قنطرتـا توحيـد غير مكحومتين تتكونان من موحدات عادية تستخدم بعدها دوائر تقطيع Chopper للتحكـم فى تيـار المجال وتيـار عضـو الاستنتـاج لكى يتـم التحكم فى سرعـة المحـرك. وفى الشكـل رقـم (١).. استخـدمـت قنطـرة توحيـد ربـاعيـة الموحـدات مـع دائرة المجـال بينما استخـدمت قنطـرة تـوحيـد سداسيـة الموحدات مع دائرة عضو الاستنتاج لأن ممانعـة دائرة المجال أكبر مـن ممانعـة عضو الاستنتـاج مما يساعـد فى تنعيم التيار Smoothing فى دائرة المجـال ولأن تيـار عضـو الاستنتـاج يجب الا يحتـوى على أى مركبـة للتيـار المتردد حتى لا تـزداد مشاكل التـوحيد Com-mutation وتظهـر الشرارة على عضـو التـوحيد.. وكـذلـك لانـه من المطلـوب التحكم فى جهد عضو الاستنتـاج بدقة وحساسيـة عاليـة حتى يتـم الحصـول على مـدى كبير لتغير السرعـة بالـدقـة والحساسية العاليـة. وللتحكم فى سرعة محرك التيار المستمـر.. يلاحـظ أنه إذا كان المحـرك عند الجهـد المقنن لعضـو الاستنتاج Rated Va والتيار المقنـن للمجال Rated If وكان محمـلاً بحمله الكـامل .. كـانـت سرعتـه هى السرعـة المقننة Rated Speed التى تدون على لوحـة بيانـات المحرك.. وإذا انخفـض عزم الحمل عن هـذه القيمة المقننة فإن السرعة تزيد قليلاً بشكل خط مستقيم ـ شكـل رقـم (٢) ـــ وهـذا هـو الخط الأساسى لتغير السرعـة مع تغير العزم على المحرك. ولكى يعمل المحرك وحمله بسرعة أقل من ذلـك يجب خفض الجهد Va لأن السرعة تتناسب طردياً مع Va وعكسيـاً مـع If وبـالطبـع.. لا يمكـن إنقاص السرعة عن القيمة المقننة بزيادة If بدلاً من إنقاص Va لأن If كانت بأكبر قيمة مقننة لها عند الخط الأساسـى.. وعند أيه قيمـة للجهد Va نحصل على خط يـوازى تقريبـاً الخط الأساسـى.. وكلما انخفض Va انخفضت السرعة.

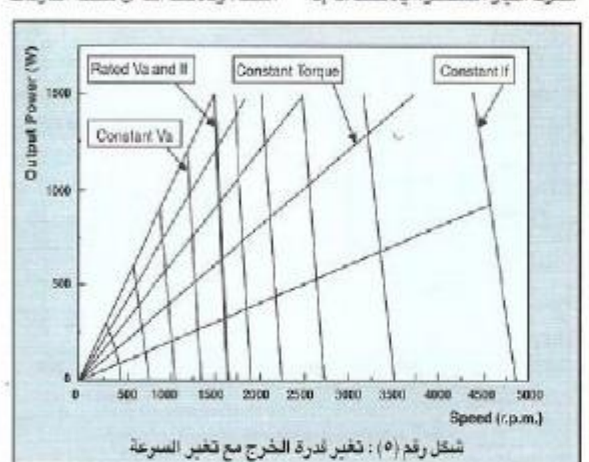
أما إذا كان المطلوب زيادة السرعة عن السرعة المقننة.. فإننا لا نستطيع زيادة Va عـن القيمـة المقننـة ولـذلـك يجب إنقاص If.. ولكل قيمة نحصـل على خط كما فى الشكـل رقم (٢). ولـذلك ..فـإن وحـدة التحكـم فى الشكـل رقـم (١) تشتمل على مفتاحين (a)، (b) ـ أحدهما (a) للسرعـات المنخفضـة الأقـل مـن السرعة المقننـة والثانـى (b) للسرعـات المرتفعة عن السرعة المقننـة ـ كل منهما عبارة عن Potentiometer تتغير قيمة مقاومته فتـؤدى إلى تغير زاوية إشعال «الثايرستور» وبالتالى تغير تيار المجال أو جهـد عضو الاستنتـاج. والعمـل فى السرعـات المنخفضـة يجب أن يكـون مفتاح السرعـات المرتفعة (b) فى بدايتـه جاعلاً If بقيمتها المقننة .. أمـا إذا كان المفتـاح (b) فى وضع أعلى مـن البدايـة فـإن تيار المجـال If ينخفض وبـالتالى يزداد Ia ليعوض If.. ولا نستطيع تحميل المحـرك بعـزم الحمل الكـامـل فى هـذا الوضع لأن Ia سوف يرتفـع عن القيمة المقننة. ونلاحظ أنـه فى منطقة السرعات المنخفضـة نستطيـع تحميـل المحـرك حتى قيمـة عزم الحمـل الكامـل لأن Ia سوف يصل إلى قيمته المقننة .. وتسمى هذه المنطقة أحيانا بمنطقة العزم الثابت Constant Torque Region ليس لأن المحرك يعطـى فيها عزمـاً ثابتـاً ولكن لأننا نستطيع تحميل المحرك فيها حتى قيمة عزم الحمـل الكامل ـ وهـى قيمة ثـابتة ـــ عنـد أيـة سرعة خـلال هـذه المنطقة. أمـا منطقة السرعـات المرتفعة تتسمى أحيـاناً بمنطقة القدرة الثـابتة Constant Power Region لأننـا نستطيع فيها تحميل المحرك حتى قيمة القـدرة المقننـة ولا نستطيـع تحميلـه بقيمة عـزم الحمل الكامـل لأن نقص If يعوضـه زيادة Ia عـن القيمة المقننـة.. وهـو الأمـر غير المرغوب لأن مفـاقيـد نحـاس عضـو الاستنتـاج تـزداد عما يتحمله وترتفع الحرارة أيضـاً أكثر من القيمة التى يتحملها.

وإذا تصورنا حملاً ثابـت العزم مع تغير السرعـة ـــ مثل الأونـاش ـــ فـإن تشغيله المثالى بمنظم السرعة هذا يكون عند البدء بجعل المفتـاح (b) فى بدايتـه Rated If وأيضاً المفتاح (a) فى بدايته حتى يعطـى أقل جهـد Va.. ثم نحـرك المفتاح (a) ليزيد Va وتزيد السرعة حتى تصل إلى السرعـة المقننة ـ حيـث يكون Va قد وصل إلى القيمة المقننة ـ ثم نترك المفتاح (a) عنـد هذا الـوضع ونحـرك المفتاح (b) لينقص If.. وتستمر السرعة فى الزيادة وعيننـا على جهاز "الأميتر" الذى يقيس Ia لأنه يختلف تبعـاً لقيمة عزم الحمل.. ونستمـر فى زيادة السرعة إلى أن يصل Ia إلى القيمة المقننـة.. ولا نستطيع زيادة السرعـة عن ذلك لأن Ia ســوف يـزداد أكثر مـن القيمــة المقننة.

والعـودة بخفض السرعـة.. يجب أن نبدأ بـزيادة If مـن المفتـاح (b) حتـى يتناقـص Ia لكـى تنقص المفـاقيـد وتتحسـن الكفـاءة. أمـا إذا بـدأنـا بإنقاص Va فإن (Ia) سوف يبقى ثابتاً عند قيمته المرتفعة لثبوت العزم وثبوت If.. وللاستمـرار فى خفض السرعـة يتم زيادة If حتى تصـل إلى قيمتها المقننـة ويكون المفتاح (b) قد وصل إلى بـدايته ثم يترك عنـد هذا الوضـع.. ويستخدم المفتاح (a) لإنقاص Va. ونلاحظ أنه إذا كان المحرك يعمل بسرعـة عالية وحدث قطع للتيـار الكهربى من المنبـع سواءً كان القطع من خارج المصنع أو نتيجة

⇦

شكل رقم (٤) : تغير تيار ملف المجال مع تغير السرعة



شكل رقم (٥) : تغير قدرة الخرج مع تغير السرعة

شكل رقم (٦) : تغير قدرة دخل المحرك مع تغير السرعة



لفصل أجهزة حماية المحرك بسبب زيادة الحمل أكثر من اللازم Over Load أو أى سبب آخر.. فإنه لا يجب إعادة توصيل الكهرباء للمحرك والمفتاحان (a)،(b) فى وضع السرعة العالية لأن التيار Ia سوف يكون عالياً جداً وسوف يقوم جهاز Over Current بفصل المحرك.. بل يجب إعادة وضع المفتاحين (a)،(b) إلى وضع الصفر ثم زيادة السرعة بالتدريج المبين سابقاً.

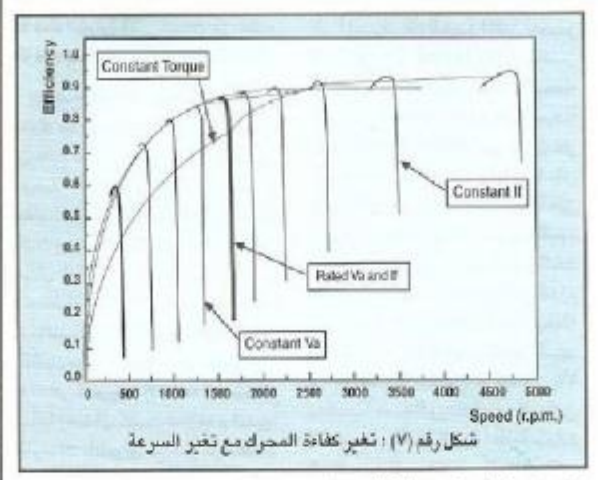
ونلاحظ من الشكل رقم (٢).. أن المحرك إذا كان محملاً بعزم الحمل الكامل فإننا لا نستطيع زيادة سرعته عن السرعة المقننة حتى لا يزداد Ia عن القيمة المقننة.. أما إذا كان العزم أقل من عزم الحمل الكامل فإننا نستطيع زيادة السرعة عن القيمة المقننة.. وكلما قل العزم أمكن زيادة السرعة أكثر ـ كما بالشكل رقم (٢) ـ الذى أعطيت فيه عدة أحمال ذات عزم ثابت مع تغير السرعة.. ولهذا فإنه يجب دائماً متابعة قراءة التيار Ia عندما نقوم بزيادة السرعة.. ولأنه عند زيادة السرعة يجب تحريك أى من المفتاحين (a)،(b) ببطء يناسب استجابة المحرك لزيادة السرعة.. أما إذا تم تحريك المفتاح بسرعة.. فإن Ia سوف يزداد وقد يصل إلى قيم أعلى من القيمة المقننة.. ولهذا يفضل دائماً استخدام جهاز «أميتر» مع عضو الاستنتاج للاطمئنان على قيمة Ia.. كما أنه بمتابعة قيمة Ia مع تغير السرعة يمكن التعرف على نوع الحمل. فإذا كان العزم ثابتاً مع تغير السرعة نجد أن Ia يبقى ثابتاً فى منطقة السرعات المنخفضة.. أما إذا كان العزم يتزايد بزيادة السرعة فإن Ia يتزايد بزيادة السرعة بنفس معدل تزايد العزم فى منطقة السرعات الأقل من السرعة المقننة.. مع ملاحظة أن Ia يتناسب مع العزم الكلى للحمل والاحتكاك الميكانيكى فى الأجزاء الدوارة.

ويوضح الشكل رقم (٣) تغير التيار Ia عند تحميل المحرك بالأحمال ذات العزم الثابت.. حيث نجد أن Ia ثابتاً فى منطقة السرعات المنخفضة لثبات If لأن العزم يتناسب طردياً مع كل من Ia،If.. وفى السرعات العالية يزداد Ia وتتوقف قيمته على قيمة عزم الحمل.

يوضح الشكل رقم (٤) تغير تيار المجال If مع تغير السرعة حيث يتضح ثبات If عند القيمة المقننة خلال منطقة السرعات المنخفضة.. بينما يقل If كما بالشكل فى منطقة السرعات المرتفعة وتكون قيمة If أعلى كلما كان عزم الحمل أقل.

أما تغير قدرة الخرج مع تغير السرعة فتكون كما فى الشكل رقم (٥).. حيث لا يمكن الحصول على قدرة الحمل الكامل خلال منطقة السرعات المنخفضة.. بينما يمكن الحصول عليها عند أى من السرعات المرتفعة. وتبعاً لتزايد قدرة الخرج تتزايد قدرة دخل المحرك كما فى الشكل رقم (٦) للحالات المختلفة لعزم الحمل. وتتغير كفاءة المحرك مع السرعة وتتوقف على قيمة عزم الحمل كما فى الشكل رقم (٧).. حيث نجد أنه فى منطقة السرعات المرتفعة تكون الكفاءة بأعلى قيمها وتقل بانخفاض السرعة وانخفاض عزم الحمل.

وتتغير قيمة القوة الدافعة الكهربية emf فى عضو الاستنتاج كما فى الشكل رقم (٨).. حيث تتزايد بزيادة السرعة فى منطقة السرعات المنخفضة وتبقى ثابتة تقريباً قرب الجهد المقنن فى منطقة السرعات المرتفعة وتقل كلما زاد عزم الحمل. وتتغير المفاقيد الكلية فى المحرك مع تغير السرعة كما فى الشكل رقم (٩) حيث نجد أن المفاقيد تتزايد بزيادة العزم على المحرك مما يؤدى إلى ارتفاع درجة حرارته وتصل إلى قيمة عالية مساوية لقيمتها عند الحمل الكامل عندما يكون العزم مساوياً لعزم الحمل الكامل فى منطقة السرعات

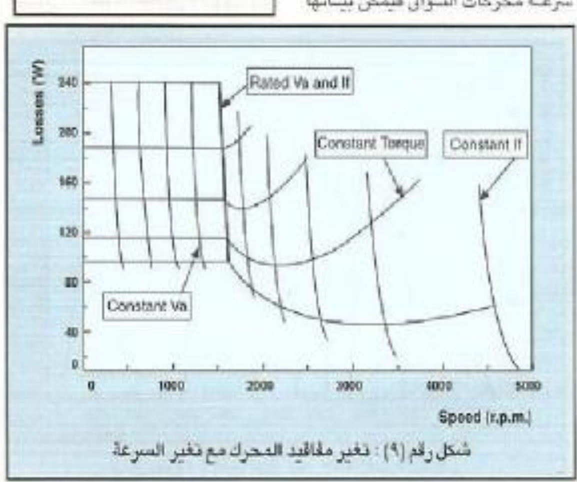


شكل رقم (٧) : تغير كفاءة المحرك مع تغير السرعة

المنخفضة.. أما فى منطقة السرعات المرتفعة فيلاحظ أن أقصى مفاقيد تقل عن تلك التى عند الحمل الكامل بالسرعة المقننة.

وهكذا.. فقد استعرضنا أهم الخواص والملاحظات للتحكم فى سرعة محركات التيار المستمر ذات التغذية المنفصلة أو المحركات المركبة.. وهى أكثر أنواع محركات التيار المستمر شيوعاً فى الاستخدام حيث لا يفضل أن يكون المحرك من نوع التوازى.. وتتم زيادة السرعة بإنقاص تيار المجال بمقاومة توصل على التوالى مع ملفات المجال أو يتم خفض السرعة بوضع مقاومة على التوالى مع عضو الاستنتاج لأن ذلك يؤدى إلى زيادة المفاقيد فى مقاومات التحكم خصوصاً المقاومة التى توصل مع عضو الاستنتاج.. كما أن هذه المقاومة تؤدى إلى إساءة خواص المحرك حيث يزداد ميل خط العزم مع السرعة مما يجعل سرعة المحرك تتغير مع تغير العزم بمعدل كبير.. كما أن هذه الطريقة التقليدية لتغيير سرعة محرك التوازى لا تعطى مدى كبيراً لتغير السرعة ولا تتمتع بالدقة والحساسية الكافية.. أما تغيير سرعة محركات التوالى فيمكن بيانها فيما بعد. وبالنسبة لمحركات التيار المستمر ذات المغناطيس الدائم Permanent Magnet DC Motors.. فإنه يتم التحكم فى سرعتها عن طريق تغيير جهد عضو الاستنتاج باستخدام نفس الأسلوب الموضح سابقاً ولكن بدون الجزء المستخدم مع تيار المجال If لأنه غير موجود.. وبالتالى فإن السرعات سوف تنحصر فى منطقة السرعات المنخفضة فقط دون إمكانية للحصول على سرعات مرتفعة.. وننوه هنا إلى أن هذه المحركات ذات المغناطيس الدائم لا يجب استخدامها إطلاقاً مع القدرات المتوسطة والكبيرة لأن المغناطيس الدائم فيها يضعف بمرور الوقت نتيجة لارتفاع درجة حرارة المحرك المعتادة ونتيجة للمجال المضعف من عضو الاستنتاج أثناء التيارات العالية سواء فى البدء أو فى الفترات الانتقالية Transient Periods.

فى العدد القادم
طرق التحكم فى سرعة محركات التيار المتردد



شكل رقم (٩) : تغير مفاقيد المحرك مع تغير السرعة

شكل رقم (٨) : تغير القوة الدافعة الكهربية مع تغير السرعة

التحكـم فى سـرعة المحركـات الكهربيـة

٢ - محركـــات التيـــار المتردد

د. فتحى عبد القادر
أستاذ الآلات الكهربية ـ هندسة شبين الكوم

تتنوع محركات التيار المتردد بين أنواع لمحركات الثلاثة أوجه وأنواع لمحركات الوجه الواحد. نبدأ بأهم هذه الأنواع وأكثرها شيوعًا فى الاستخدام وهى المحركات التأثيرية ذات الثلاثة أوجه Three Phase Induction Motors حيث تتركز الطرق الرئيسية للتحكم فى السرعة بين:

١ ـ تغيير الجهد المسلط على المحرك:

لتغيير السرعة عن طريق تغيير الجهد المسلط على المحرك.. تصبح وسيلة التحكم فى السرعة هى التى تقوم بتغيير الجهد.. ويتم ذلك بعدة طرق أهمها: استخدام ممانعة حثية Inductive Reactance متعددة الأطـــراف ـــ أو استخدام «الثايرستور» كما فى الشكل رقم (١). والممانعة الحثية تتكون من ثلاثة ملفات متماثلة كل منها موضوع على قلب يشبه تمامًا القلب الحديدى لمحول ثلاثى الأوجه.. أو يوضع كل ملف على قلب حديدى مستقل يشبه القلب الحديدى لمحول ذى وجه واحد. وهذه الممانعة أقل تكلفة مما لو استخدم محول لخفض الجهد لنفس الهدف.. وذلك لأن الملف يكون عليه نحو ٤٠٪ من جهد الوجه فى حالة الممانعة بينما يكون عليه ١٠٠٪ من جهد الوجه فى حالة المحول.. وبالتالى تكون عدد لفاته وحجمه ومن ثم حجم النحاس والحديد والتكلفة أعلى فى المحول عنها فى الممانعة. وإذا استخدمت مقاومات بدلاً من الممانعات.. فإن القدرة المفقودة فى هذه المقاومات تكون كبيرة وتمثل عيبًا كبيرًا.

أما عند استخدام «الثايرستور».. فإن التكلفة يجب أن تكون أقل من أية طريقة أخرى عندما تكون الأسعار حقيقية وغير مغال فيها. وتتميز هذه الطريقة أيضًا بانعدام القدرة المفقودة فيها تقريبًا وكذلك مدى أوسع وأكثر حساسية لتغير السرعة. أما العيب الرئيسى لهذه الطريقة فهو تشويه موجة جهد المحرك عن الموجه الجيبية مما يزيد مفاقيد المحرك ذاته إلى جانب سرعة تلف بعض المكونات الالكترونية وحاجتها للصيانة.

ويلاحظ.. أنه يمكن استخدام أى من الطرق السابقة للتحكم فى السرعة فى بدء الحركة Starting للمحرك.. أى أنه يمكن إنقاص تيارات المحرك عند البدء وإيصالها إلى قيم يتحملها المحرك.. كما يمكن استخدام هذه الطرق لعمل بدء ناعم Soft Starting للمحرك حيث ينقص عزم بدء المحرك إلى قيمة عزم بدء الحمل ثم يزداد بالتدريـــج. ويتـــم البـــدء الناعـــم أوتوماتيكيًا بسهولة باستخدام «الثايرستور» والمكونات الالكترونية المختلفة.

ومن الشكل رقم (٢) تتضح إمكانية أى من طرق خفض الجهد المسلط على المحرك فى تغيير السرعة.. حيث يكون عزم المحرك كبيرًا عند الجهد المقنن (V1) خلال كل السرعات من الصفر وحتى سرعة التزامن (١٥٠٠ لفة / دقيقة).. بيما يتناقص كل منحنى العزم كلما انخفض الجهد إلى V2 حتى V5 ـ حيث يتناسب العزم عند اى سرعة مع مربع الجهد ــ ونجد أن العزم الأقصى للمحرك Maximum Torque يبقى عند نفس السرعة (١٢٠٠ لفة / دقيقة) عند جميع الجهود لهذا المحرك.

وتتحدد السرعة التى سوف يدور بها الحمل عند أى جهد.. من تقاطع منحنى عزم المحرك ومنحنى عزم الحمل. فإذا كان الحمل من نوع المراوح أو طلمبات الطرد المركزى فإن المنحنى يأخذ شكل Fan Load. أما إذا كان الحمل ذا عزم ثابت Constant Torque Load ـ مثل المصاعد والأوناش والدرفلة ـ كالمبين بالشكل.. فإن هذين النوعين من الاحمال يعملان عند سرعة n1 بقيمة (١٤٠٠ لفة/ دقيقة) عندما يكون الجهد V1. أما إذا انخفض الجهد إلى V2 فإن منحنى المحرك يتقاطع مع منحنى Fan عند السرعة n2.. وباستمرار خفض الجهد حتى V5 تنخفض السرعة حتى n5 كما بالشكل.

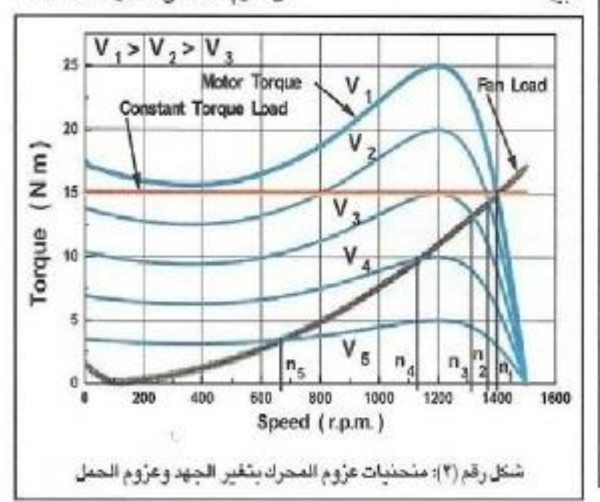
ويلاحظ أن مدي تغير السرعة مع حمل Fan يكون كبيرا (١٤٠٠ ــ ٦٦٠ لفة/ دقيقة) بينما إذا كان الحمل ثابت العزم فإن السرعة تتغير من ١٤٠٠ إلى أكثر قليلاً من ١٢٠٠ لفة / دقيقة عند الجهد V3.. لانه إذا انخفض الجهد لأقل من V3 فإن عزم المحرك عند أية سرعة يكون أقل من عزم الحمل ولا يحدث تقاطع بين منحنى الحمل ومنحنى المحرك.. بل إنه مع هذا الحمل الثابت العزم.. فعند خفض الجهد عن V3 تنخفض سرعة المحرك إلى الصفر فورًا ولا يستطيع تشغيل الحمل.

ويوضح الشكل رقم (٢) ملاحظة مهمة.. وهى أن منحنى الحمل تقاطع مع منحنى المحرك عند الجهدين V5 وV4 عند أقل من سرعة العزم الأقصى.. وهناك خطأ شائع بأن المحرك لا يستطيع أن يعمل عند أقل من سرعة

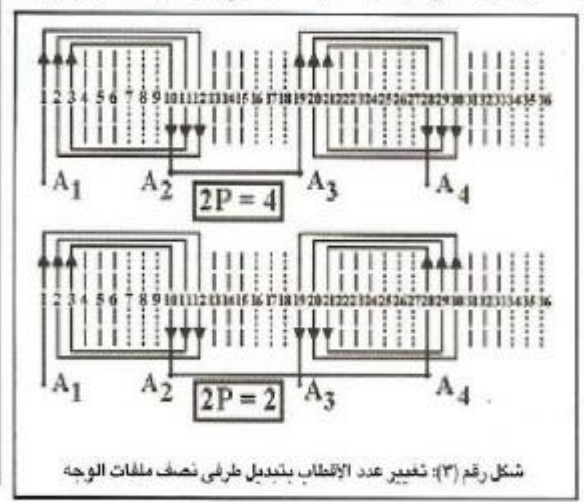
a - Reactance Control

b - Thyristor Control

شكل رقم (١): تغيير جهد المحرك للتحكم فى السرعة



شكل رقم (٢): منحنيات عزوم المحرك بتغيير الجهد وعزوم الحمل



شكل رقم (٣): تغيير عدد الأقطاب بتبديل طرفى نصف ملفات الوجه

العزم الأقصى.. والصحيح أن الجهد إذا كان بالقيمة المقننة Rated فإنه يستطيع تشغيل حمل مثل Fan بسرعة أقل من سرعة العزم الأقصى ولكن التيار يكون عاليًا وبقيمة أكبر من القيمة المقننة ولا يتحملها المحرك لفترة طويلة. أما في حالة حمل Fan فإن المحرك يعمل عند السرعتين n5 وn4 بصورة طبيعية لأن الجهد يكون قد انخفض بدرجة مناسبة لخفض التيار عن القيمة المقننة.

ولهذا.. فإن طريقة خفض الجهد تكون أكثر استخدامًا وشيوعًا مع الأحمال من نوع المراوح وطلمبات الطرد المركزي وطلمبات الأعماق والشفاطات. وهذه النوعية من الأحمال تتغير قدرة الخرج لها بدرجة كبيرة مع أي تغير بسيط في السرعة.. لأن قدرة الخرج تتناسب مع مكعب السرعة ($P\alpha n^3$).لذلك.. فإن هذا المدى لتغير السرع - رغم أنه صغير - يكون كافيًا لإحداث تغير كبير في كمية الهواء أو كمية المياه.

٢ - تغيير عدد الأقطاب:

يمكن تغيير السرعة بتغيير عدد الأقطاب.. لأن سرعة المحرك تقترب من سرعة التزامن n_s التي تتغير بتغير عدد الأقطاب 2p حسب العلاقة ($n_s = 120f / 2p$).. وحيث أن f هي تردد المنبع — ويكون ثابتًا — فإن تغير عدد الأقطاب يؤدي إلى تغير السرعة.. فإذا زاد عدد الأقطاب إلى الضعف تنخفض السرعة إلى النصف. ويقال إن هذه الطريقة هي أبسط الطرق لتغيير السرعة لأن وسيلة التحكم في السرعة تكون مجرد مفتاح بسيط يعدل توصيلات ملفات المحرك فقط وتكون أقل الطرق تكلفة ولا تحتاج إلى صيانة تقريبًا. ورغم ذلك فإن هذه الطريقة - للأسف — لا تأخذ حقها في جميع المراجع العلمية المتخصصة مما يسبب مشاكل كثيرة للمهندس عند التعامل معها ومع المحرك المجهز لها.. ولهذا فسوف نتناول هذه الطريقة بمزيد من الإيضاح..

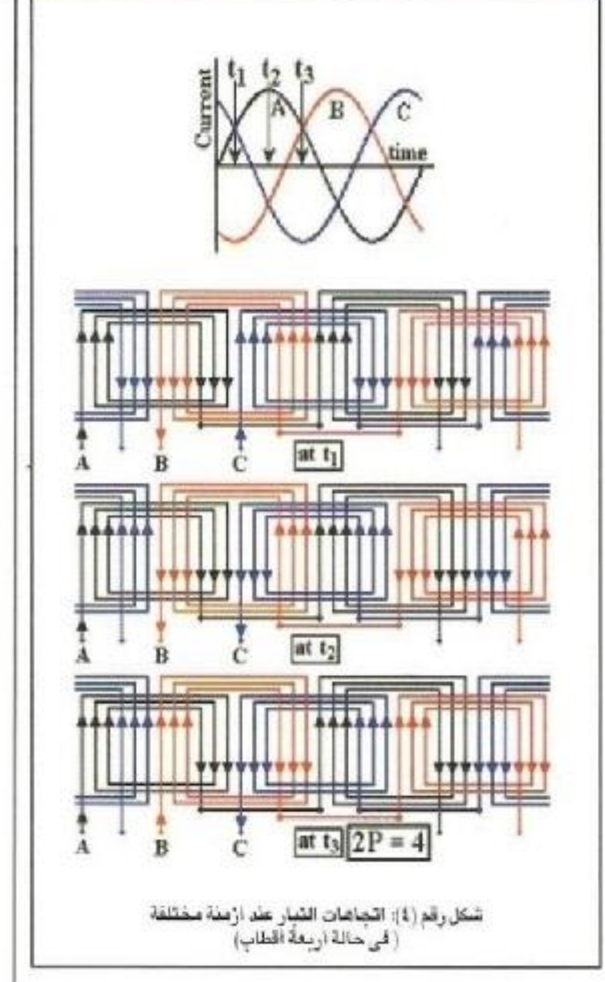
تستخدم هذه الطريقة مع المحركات المصممة لتعطي عددًا معينًا من الأقطاب بحيث يخرج طرف من منتصف كل وجه بالإضافة إلى طرفي بداية ونهاية الوجه ثم يعدل التوصيل لخفض عدد الأقطاب إلى النصف لزيادة السرعة إلى الضعف.. حيث تستخدم مع المحرك ذي الأربعة أقطاب ويعدل إلى قطبين أو المحرك ذي الثمانية أقطاب ويعدل إلى أربعة أقطاب أو المحرك ذي ١٢ قطبًا ويعدل إلى ٦ أقطاب.. وبذلك فإن هذه الطريقة تستخدم للحصول على سرعتين فقط.. وفي بعض الحالات الخاصة يمكن عمل تعديل آخر للحصول على سرعة ثالثة من نفس الملفات.

يوضح الشكل رقم (٣) الفكرة الأساسية لتغيير عدد الأقطاب بتعديل التوصيل لملفات المحرك.. كما يوضح الشكل تعديل أحد الأوجه حيث يتم توصيل نهاية مجموعة الثلاثة ملفات الأولى A2 ببداية المجموعة الثانية A3 فنحصل على أربعة أقطاب وتكون بداية هذا الوجه A1 ونهايته A4. وللحصول على قطبين يتم تبديل أطراف المجموعة الثانية فقط حيث توصل النهاية A2 بالنهاية A4 وتكون بداية الوجه هي A1 ونهايته هي A3.

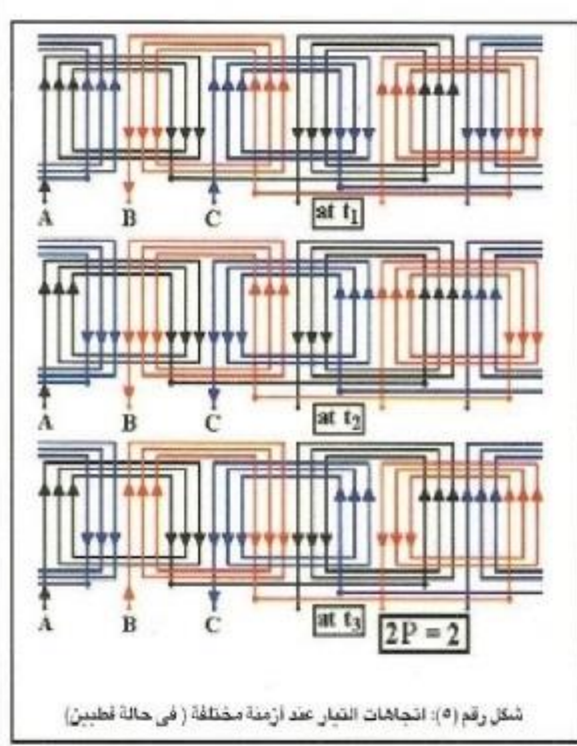
وهذا الشكل — رقم (٣) — هو ما يشرح هذه الطريقة في المراجع العلمية.. ولكن الأمر ليس بهذه البساطة.. فسوف نجد أن تطبيق هذا التعديل في التوصيل من أربعة أقطاب إلى قطبين لا يحقق الحصول على قطبين لأننا لا نحصل على الأربعة أقطاب من وجه واحد فقط بل من الثلاثة أوجه.. وكل وجه يتغير اتجاه تياره من الموجب إلى السالب في وقت مختلف في الوجهين الآخرين.. ويجب أن نحصل على الأربعة أقطاب في أي وقت. ويتضح ذلك من الاتجاه الواحد للتيار في مجموعة مجاري متجاورة تخص الثلاثة أوجه.. وتكون المجموعة التالية مختلفة عنها في الاتجاه.. وهكذا حتى باقي المجموعات الأربع من المجاري التي تعطي أربعة أقطاب كما في الشكل رقم (٤). ومن شكل موجات التيار وعند اللحظة الزمنية t1 يكون تيار الوجه الأول A موجبًا أي داخلاً من بداية الوجه A وكذلك الوجه C.. أما الوجه B فيكون سالبًا ويخرج التيار من بداية الوجه B. ونحصل على أربعة أقطاب عند الزمن t1.. وعند الزمن t2 ينعكس التيار في الوجه C ليصبح سالبًا ونحصل أيضًا على أربعة أقطاب.. وعند الزمن t3 يصبح تيار الوجه B موجبًا ونحصل أيضًا على أربعة أقطاب. ونلاحظ أن المجاري ذات الاتجاه الواحد تتحرك يمينًا عند الزمن t2 عما كانت عليه عند الزمن t1.. وعند الزمن t3 تتحرك نفس المجاري يمينًا أكثر وهذا ما ينتج المجال المغناطيسي الدائري Rotating Field.

وإذا تم عمل التعديل المبين في الشكل رقم (٣) للحصول على قطبين من أربعة أقطاب تحدث عدة أخطاء.. أولها أن ملفات الوجه في الأربعة أقطاب والقطبين تبقى جميعها متصلة على التوالي. وإذا تم توصيل نفس جهد المنبع إلى الملفات في كل من السرعتين يصبح الجهد على نفس الملفات بنفس عدد اللفات واحدًا - وهذا لا يجب - بل يجب زيادة الجهد في السرعة العالية عن السرعة المنخفضة

⇦



شكل رقم (٤): اتجاهات التيار عند أزمنة مختلفة (في حالة أربعة أقطاب)



شكل رقم (٥): اتجاهات التيار عند أزمنة مختلفة (في حالة قطبين)

حتى نحصل على أكبر قدرة ممكنة من المحرك.. ويتضح ذلك من المعادلة (E = 4.44 fØNK).. فإذا كان الجهد واحدًا فإن E تكون واحدة تقريباً ولكن عدد خطوط المجال Ø للقطب تكون أكبر في حالة القطبين عن الأربعة أقطاب عندما نحتفظ بنفس كثافة المجال المغناطيسي للمحافظة على قدرة المحرك لأن مساحة القطب في حالة القطبين تكون ضعف مساحة القطب في الأربعة أقطاب.. ولكن نظرًا لثبات أبعاد باقي الدائرة المغناطيسية فإن الزيادة في عدد خطوط المجال Ø لاتصل إلى الضعف بل تزداد بنسبة ١٦٪.. وإذا كان عدد اللفات لكل وجه N ثابتًا فإن E وبالتالي جهد الوجه يجب أن يزداد بنسبة ١٦٪ في حالة القطبين عن الأربعة أقطاب أو يتم إنقاص عدد اللفات في حالة القطبين عن الأربعة أقطاب.

والخطأ الثاني هو عدم بقاء عدد الأقطاب مساويًا للقطبين عند أية لحظة كما يظهر من الشكل رقم (٥).. حيث يكون عدد الأقطاب ٦ عند كل من الزمن t3 ،t2 ،t1 كما يختلف عرض القطب Pole Spread من لحظة إلى أخرى.

والخطأ الثالث هو عدم تكون المجال الدائري حيث تجد أن مجموعة المجاري المتجاورة ذات الاتجاه الواحد للتيار تتحرك من لحظة إلى أخرى مرة يمينًا وأخرى يسارًا.. بينما يجب أن تتحرك في اتجاه واحد بسرعة التزامن.

وللتغلب على هذه الأخطاء يجب أن يتم التعديل في عدد الأقطاب بالشروط التالية:

١ - أن يكون انتشار ملفات الوجه في مجاري كل قطب Phase Spread بقيمة ١٢٠° وليس ٦٠°.

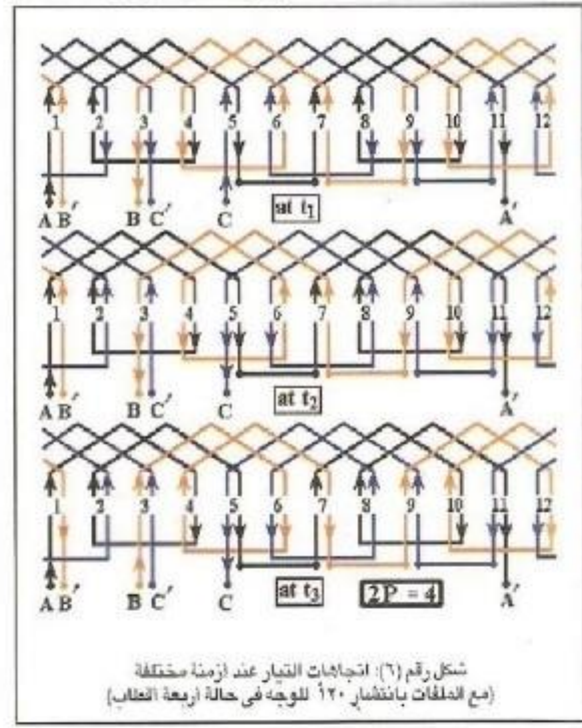
٢ - أن تكون ملفات العضو الثابت للمحرك ملفوفة بطريقة جانبي ملف في المجرى Double Layer وهي طريقة لازمة لتحقيق الشرط الأول.

٣ - ضبط توصيل أجزاء ملفات كل وجه بحيث توصل بدايات ونهايات الأوجه إلى المنبع بشكل «نجمة» أو «دلتا» في حالة السرعة البطيئة.. أما في السرعة العالية فيوصل المنبع إلى منتصف اللفات حتى يمر التيار في نصف الوجه في اتجاه وفي النصف الثاني في الاتجاه المضاد.

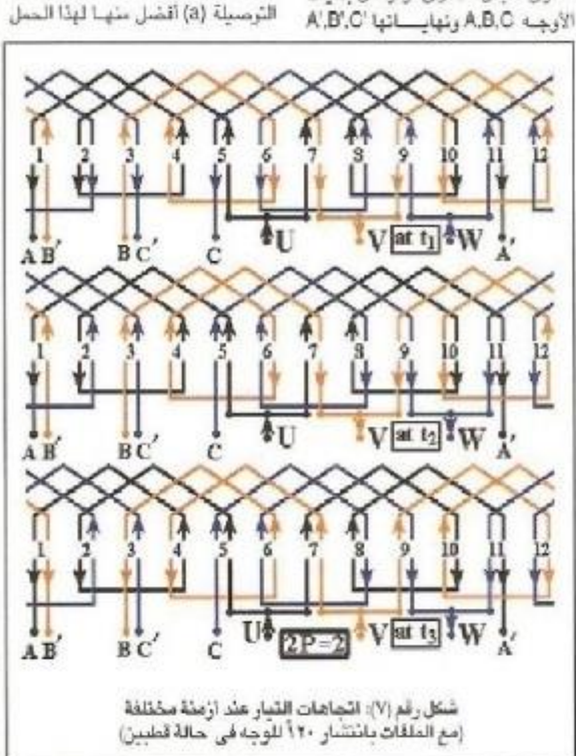
٤ - ضبط توصيل أجزاء ملفات كل وجه بحيث يكون الجهد الواصل للملفات مناسبًا لإعطاء عزم يناسب نوع الحمل المستخدم مع المحرك.

ولتوضيح هذه الشروط الأربعة.. أخذ عضو ثابت مكون من ١٢ مجرى - بدلاً من ٣٦ مجرى في الأشكال من (٣) إلى (٥) - لسهولة بيان اللف من نوع Double Layer - 120° Phase Spread. ففي الشكل رقم (٦) حيث يكون المحرك أربعة أقطاب.. تكون عدد المجاري للقطب ٣ مشتملة على ١٨٠° كهربية.. أي أن المجرى زاويتها ٦٠° كهربية.. فإذا كان انتشار الوجه ٦٠° في كل قطب فإن ملفات الوجه توضع بحيث تشغل مجرى واحدة في كل قطب. وفي الشكل رقم (٦) يكون انتشار الوجه في كل قطب ١٢٠° مما يجعل ملفات الوجه تشغل ٢ مجرى في كل قطب وتتداخل ملفات وجه مع وجه آخر في نفس المجرى.. بينما كان كل وجه مستقلاً في المجاري في حالة انتشار ٦٠°.. وتكون بداية الأوجه A,B,C ونهاياتها A',B',C'. وعند اللحظات الزمنية t1',t2',t3 المبينة في الشكل رقم (٤).. يكون اتجاه التيارات كما في الشكل رقم (٦) حيث تكون التيارات لأسفل في المجاري 2,3,4,5 في الزمن t1.. وتتحرك يميناً عند الزمن t2.. ويميناً أكثر عند الزمن t3 لتشكل المجال الدائري. ويلاحظ أن المجريين 2,5 عند الزمن t1 يكون في كل منهما جانب ملف تياره لأعلى وآخر تياره لأسفل.. وهذا لا يلاشي مجال المجرى ولكنه يحسن من جعل توزيع كثافة المجال بشكل جيبي. وفي هذا الشكل تنشأ الأربعة أقطاب بالشكل المعتاد.

ويوضح الشكل رقم (٧) التعديل الذي تم على الأربعة أقطاب في الشكل رقم (٦) للحصول على القطبين.. حيث تم تغذية كل وجه من المنتصف في النقاط U,V,W حتى يمر التيار في نصف كل وجه في اتجاه وفي النصف الثاني في الاتجاه المضاد حتى نحصل في أي من اللحظات الزمنية t1,t2,t3 على مجموعة متجاورة من التيارات لأسفل وأخرى لأعلى لتشكل القطبين.. أهم ما يميزها أنها تتحرك يمينًا مع الزمن لتكون المجال الدائري. وتوصل بدايات الأوجه A,B,C ونهاياتها A',B',C' جميعها مع بعضها البعض حتى يصبح نصفا كل وجه متصلين بالتوازي والأوجه الثلاثة متصلة «نجمة» كما في الشكل رقم (٨). وهكذا تكون الشروط الثلاثة الأولى قد تحققت.. أما الشرط الرابع لجعل جهد اللفات مناسبًا في كل من السرعتين العالية والبطيئة.. فإنه يتحقق كما في الشكل رقم (٨) حيث نجد أن الحمل عندما يكون من نوع Fan فإنه يحتاج لعزم صغير في السرعة المنخفضة ولذلك يفضل خفض الجهد إلى نصف جهد السرعة العالية.. حيث يكون الجهد ١١٠ف لنصف ملف الوجه في السرعة المنخفضة المبينة في التوصيلة (a) وذلك بتوصيل نصفي كل وجه بالتوالي والأوجه موصلة «نجمة» إلى منبع جهده ٣٨٠ف.. بينما في السرعة العالية بالتوصيلة (c) كان جهد نصف الوجه ٢٢٠ف من نفس المنبع.. أما عندما يكون الحمل من نوع Constant Torque فإنه يحتاج إلى نفس العزم العالي عند السرعة المنخفضة.. ولهذا يكون جهد نصف الوجه أكبر من حالة Fan حيث يكون ١٩٠ف ويتم ذلك بتوصيل نصفي الوجه بالتوالي وتوصل الأوجه دلتا إلى نفس المنبع ٣٨٠ف كما في التوصيلة (b). ويوضح الشكل (d) منحنيات عزم المحرك وعزوم الحمل للتوصيلات المختلفة a,b,c. ويلاحظ.. أنه إذا كان الحمل Fan فإنه يمكن استخدام التوصيلة (b) لتشغيل هذا الحمل عند السرعة المنخفضة.. إلا أن التوصيلة (a) أفضل منها لهذا الحمل



شكل رقم (٦): اتجاهات التيار عند أزمنة مختلفة
(مع الملفات بانتشار ١٢٠° للوجه في حالة أربعة أقطاب)



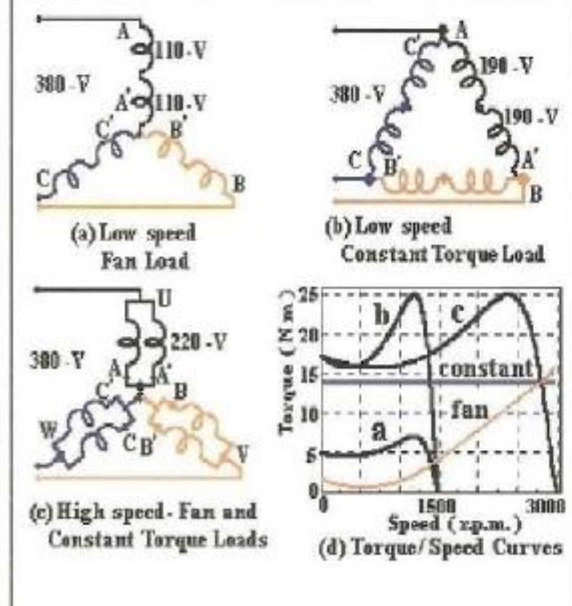
شكل رقم (٧): اتجاهات التيار عند أزمنة مختلفة
(مع الملفات بانتشار ١٢٠° للوجه في حالة قطبين)

لأن مفاقيد المحرك تقل وبالتالي تنخفض حرارته وتتحسن الكفاءة ومعامل القدرة **ويتم توفير الطاقة** الكهربية. أما التوصيلة (a) فإنها لا تصلح لتشغيل الحمل Constant Torque في السرعة المنخفضة لأن عزم المحرك أقل من عزم الحمل.. وتصمم ملفات المحرك بحيث يكون جهد التصميم ٢٢٠ف لنصف ملفات الوجه عند السرعة العالية.

ويسمى تعديل الأقطاب بهذا الأسلوب بطريقة Dahlander أو Pole Amplitude Modulation.. ولكى يتم **تعديل توصيل الملفات بسهولة** للحصول على السرعتين فإنه يتم تصنيع هذه المحركات بحيث يستخدم المحرك إما مع حمل Fan أو مع حمل **Constant Torque** لأن **التوصيلات** الداخلية من ملفات المحرك إلى روزته التوصيل تختلف لهذين النوعين من الأحمال كما في الشكل رقم (٩). وفي حالة Fan Load توصل ملفات الأوجه داخل المحرك بشكل «نجمة»، وتوصل بداية الأوجه **U1,V1,W1** إلى الروزته كما بالشكل.. أما منتصف الأوجه **U2,V2,W2** فتوصل إلى الروزته أيضاً. وفي حالة السرعة المنخفضة يوصل المنبع إلى الأطراف **U1,V1,W1**.. أما في السرعة العالية فتوصل الأطراف **U1,V1,W1** **ببعضها البعض** بواسطة كبارى ويوصل المنبع إلى الأطراف **U2,V2,W2**. وفي المحرك الخاص بالحمل..Constant Torque يوصل المحرك في الداخل بشكل «دلتا» وتوصل أطراف الخطوط **U1,V1,W1** إلى الروزته.. كما توصل أطراف منتصف الأوجه **U2,V2,W2** إلى الروزتة. وفي حالة السرعة المنخفضة أو العالية يوصل المنبع إلى روزته المحرك بنفس الأسلوب المتبع مع المحرك الخاص بحمل Fan.

ويحدث لبس لكثير من المهندسين عندما يجدون أن روزته المحرك تقليدية ذات ستة أطراف توجد بها كبارى لعمل نقطة «نجمة».. وعندما تحدث مشكلة للمحرك ينزعون الكبارى ويقيسون المقاومة بين الأطراف الستة للروزتة ويجدون أنها تقيس مقاومة بسيطة بين كل الأطراف فيظنون أن المحرك حدث له خطأ قصر Short بين ملفاته.. ولكن اللفات يمكن أن تكون سليمة مع هذه القياسات لأن اللفات موصلة مع بعضها من الداخل بعيدًا عن الروزتة بالشكل رقم (٩).

وللتعرف على ما إذا كان المحرك مجهزًا لحمل Fan أو لحمل Constant Torque فإن ذلك يكون أما مكتوبًا صراحة على لوحة بيانات المحرك أو يستنتج من قدرة خرج المحرك لكل من السرعتين العالية والمنخفضة حيث تكون النسبة بين قدرة خرج السرعة العالية إلى قدرة خرج السرعة المنخفضة في حدود (١,٢) في حالة Constant Torque وفي حدود من (٣ - ٤) في حالة Fan.. مع ملاحظة أن أكثر الأنواع شيوعًا هو الخاص بحمل Constant Torque لأنه يستطيع أيضًا أن يشغل حمل Fan ولكن بكفاءة منخفضة.



شكل رقم (٨): تعديل الملفات لضبط الجهد المناسب للسرعة وعزم الحمل

(a) For Fan Loads — Low Speed / High Speed

(b) For Constant Torque Loads — Low Speed / High Speed

شكل رقم (٩): توصيل الملفات إلى الروزتة والمنبع

ويلاحظ أن هذه الطريقة للتحكم في السرعة عن طريق تغيير عدد الأقطاب **تستخدم فقط مع المحركات التأثيرية** ثلاثية الأوجه من نوع Squirrel Cage – ولا تصلح للاستخدام مع المحركات من نوع Wound Rotor أو مع المحركات التزامنية وذلك لأن التعديل يتم في عدد أقطاب العضو الثابت فقط. والعضو الدائر من نوع Squirrel Cage تتعدل أقطابه مباشرة تبعاً لأقطاب العضو الثابت.. أما العضو الدائر من نوع Wound Rotor أو في المحرك التزامني فإن عدد أقطابه يبقى ثابتًا مهما تغير عدد أقطاب العضو الثابت.. ولا ينشأ عزم مناسب في حالة اختلاف عدد أقطاب العضو الدائر عن العضو الثابت.

في العدد القادم
طرق التحكم في السرعة بتغيير التردد

التحكم في سرعة المحركات الكهربية بتغيير التردد

د. فتحى عبد القادر
رئيس قسم الهندسة الكهربية وأستاذ الآلات الكهربية ـ هندسة شبين الكوم

أدى التطور المستمر في المكونات الالكترونية إلى سهولة تغيير تردد الجهد المسلط على المحركات الكهربية. وقد كان العيب الرئيسي للمحركات التأثيرية هو صعوبة التحكم في السرعة بمثل ما يتم مع محركات التيار المستمر.. مما كان يحتم استخدام محركات التيار المستمر عندما يحتاج الحمل الميكانيكي إلى التحكم في سرعته بدقة وحساسية ومدى كبير برغم أن محركات التيار المستمر أغلى ثمنًا وأكثر حاجة للصيانة وأقصر عمرًا من المحركات التأثيرية.

وبتغيير التردد للمحركات التأثيرية.. يتم التحكم في سرعتها خلال مدى كبير وبدقة وحساسية عالية.. لأن سرعة المحرك تقترب من سرعة التزامن التي تتناسب مع التردد. ويتم الحصول على تردد متغير باستخدام جهاز مغير التردد Frequency Converter الذي يتكون من جزئين ــ شكل رقم (١) ـ الأول عبارة عن قنطرة توحيد Bridge Rectifier محكومة بالثايرستور ليتم التحكم في جهد التيار المستمر الخارج منها وبالتالي جهد التيار المتغير الذي يوصل للمحرك.. و الثاني عبارة عن مقطع للتيار المستمر ليحوله إلى تيار متغير Inverter حيث تكون كل موجة عبارة عن نبضات يختلف عرضها الذي يمثل الزمن وارتفاعها الذي يمثل قيمة الجهد كما بالشكل رقم (١). وهذا الأسلوب الحصول على موجة تقترب من الشكل الجيبي Sinusoidal يسمى بالنبضات المعدلة العرض Pulse Width Modulation. وللاقتراب أكثر من الشكل الجيبي.. يحدث تعديل لقيمة الجهد الذي يمثله ارتفاع النبضة بحيث يأخذ مستويين أو ثلاثة كما بالشكل.

و قيمة الجهد المناسب لكل تردد هي العلاقة الأساسية التي تحكم أداء المحرك وتحدد خواصه.. لأن تغير التردد يغير ممانعات المحرك وبالتالي تياراته. فإذا سلط جهد V على ممانعة Reactance قيمتها X يمر بها تيار قيمته V/X = I.. وإذا انخفض التردد إلى النصف مثلاً.. فإن الممانعة تنخفض إلى النصف ويزداد التيار إلى الضعف إذا كان الجهد ثابتًا.. وحتى لايزداد التيار وبالتالي تزداد مفاقيد النحاس Copper Losses وتؤدى إلى احتراق الملفات يجب أن ينخفض الجهد إلى النصف حتى يبقى التيار ثابتًا. وهذه العلاقة تعني ثبات النسبة بين الجهد V إلى التردد F ‏(V/F = Constant). وبثبات التيار تبقى مفاقيد النحاس ثابتة عند القيمة التي يتحملها المحرك وذلك بخفض التردد عن التردد الأساسي المصمم عليه المحرك Base Frequency وتنخفض المفاقيد الحديدية Iron Losses بانخفاض التردد كما في الشكل رقم (٢).

أما بزيادة التردد عن التردد الأساسي.. فإن المفاقيد الحديدية تزداد لأن مفاقيد التيارات الإعصارية Eddy Current Losses تتناسب مع مربع التردد.. ومفاقيد التعويض المغناطيسي Hysteresis Losses تتناسب مع التردد. وعلى ذلك.. فإنه بزيادة التردد عن التردد الأساسي وباستمرار المحافظة على النسبة V/F = Constant تزداد مفاقيد الحديد وتمثل خطورة على المحرك كما في الشكل رقم (٢) الذي يبين تغير مفاقيد الحديد ومفاقيد النحاس ومجموع هذه المفاقيد لمحرك ٢ حصان ذي أربعة أقطاب جهد وجهه المقنن ٢٢٠ ف وتردده المقنن ٥٠ ذ/ث حيث تكون مفاقيد الحديد عند اللاحمل ٨٠ وات ومفاقيد النحاس ١٢ وات.. وعندما يعمل المحرك على التردد المقنن وبزيادة عزم الحمل حتى الحمل الكامل تقل مفاقيد الحديد إلى ٦٠ وات وتزداد مفاقيد النحاس إلى ٢٢٣ وات وبالتالي تكون المفاقيد الكلية ٢٨٣ وات عند الحمل الكامل وهي المفاقيد المقننة التي لا يتحمل المحرك أكثر منها. وإذا عمل المحرك على ١٠٠ ذ/ث مع ثبات النسبة V/F يكون جهد الوجه ٤٤٠ ف وتزداد مفاقيد الحديد عند اللاحمل إلى ٦٧٧ وات وتؤدى إلى زيادة التيار ليغذي هذه المفاقيد وبالتالي تزداد مفاقيد النحاس عند اللاحمل إلى ١٥,٤ وات. وعند زيادة عزم الحمل إلى القيمة التي يجب أن يتحملها المحرك تقل مفاقيد الحديد إلى ٤١٤ وات وتزداد مفاقيد النحاس إلى ٦٦٩ وات ويكون مجموع المفاقيد ١٠٨٢ وات وهي أعلى بكثير من التي يتحملها المحرك (٢٨٣ وات).

لهذا .. فعادة ما يتم تشغيل المحرك على جهد ثابت يساوى الجهد المقنن عندما يكون التردد أعلى من التردد المقنن.. ويتم التشغيل على النسبة V/F = Constant عند الترددات الأقل من التردد المقنن. وفي هذه الحالة تنخفض مفاقيد الحديد ومفاقيد النحاس عند الترددات العالية ـ شكل رقم (٣).

ويقال إن منطقة الترددات المنخفضة هي منطقة المجال المغناطيسي الثابت Constant Flux وبالتالي العزم الأقصى Maximum Torque الثابت وعزم الحمل الكامل Full Load Torque الثابت.. أما قدرة خرج المحرك فإنها تتزايد في هذه المنطقة. وتسمى منطقة الترددات المرتفعة بمنطقة القدرة الثابتة للخرج والجهد الثابت كما تسمى بمنطقة المجال الضعيف Weaking Flux حيث يتناقص فيها المجال المغناطيسي وبالتالي العزم. وفي هذه الحالة تكون خواص الأداء للمحرك كما بالأشكال أرقام (٤)، (٥)، (٦)..

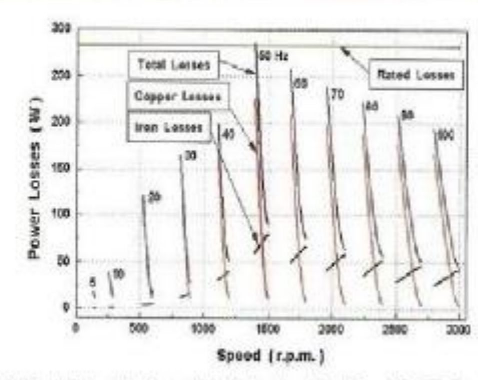
و تتغير عزوم المحرك عند الترددات المختلفة وينخفض العزم الأقصى للمحرك وبالتالي عزم الحمل الكامل في الترددات المختلفة كما بالشكل رقم (٤).. وينخفض العزم الأقصى للمحرك وبالتالي عزم الحمل الكامل في الترددات المنخفضة ولا يبقى ثابتًا وذلك لأن المحرك لايكافىء ممانعة Reactance فقط.. بل يكافىء ممانعة ومقاومة لكل وجه وتتغير الممانعة بتغير التردد وتظل المقاومة ثابتة وبالتالي فإن ثبات النسبة

Converter Inverter
Frequency Converter
Voltage Wave Form

شكل رقم (١) : مكونات مغير التردد وشكل موجة الجهد



شكل رقم (٢) : تغير مفاقيد المحرك عند ثبات النسبة بين الجهد والتردد لجميع الترددات



شكل رقم (٣): تغير مفاقيد المحرك عند ثبات الجهد في الترددات المرتفعة وثبات نسبة الجهد إلى التردد في الترددات المنخفضة

شكل رقم (٤): تغير عزوم المحرك عند الترددات المختلفة

(V/F) لا يثبت التيار الذي يتناقص كلما انخفض التردد خصوصًا في الترددات المنخفضة جدًا وذلك لزيادة نسبة المقاومة إلى الممانعة التي نقصت كثيرًا.. وتسمى هذه المشكلة بتأثير مقاومة المحرك. وفي الترددات المرتفعة لاتظهر هذه المشكلة لزيادة نسبة الممانعة إلى المقاومة ولكن تظهر مشكلة مفاقيد الحديد العالية.

ويبين الشكل رقم (٥) انخفاض تيار الحمل الكامل في الترددات المنخفضة وانخفاضه بمعدل بسيط بزيادة التردد عن التردد الرئيسي، ويلاحظ تناقص تيار اللاحمل بزيادة التردد. ومن الشكل رقم (٦) يلاحظ أن قدرة الحمل الكامل لاتكون ثابتة عند الترددات المرتفعة بل تتناقص. ويلاحظ من الشكل رقم (٣) أن مفاقيد المحرك بهذا الأسلوب لتغير الجهد مع التردد - تكون منخفضة عن القيمة التي يتحملها المحرك - وذلك عند زيادة أو خفض التردد عن التردد الرئيسي - الأمر الذي يتيح إمكانية زيادة الجهد عن هذا المعدل إلى القيم التي تصل عندها مفاقيد المحرك إلى قيمة المفاقيد المقننة (٢٨٣ وات في هذا المحرك) - وذلك الحصول على أكبر عزوم وقدرات ممكنة من المحرك. لهذا.. يجب زيادة الجهد عن هذا المعدل (V/F ثابتة) في الترددات المنخفضة حيث نحافظ على ثبات قيمة المجال المغناطيسي وبالتالي العزم الأقصى المقنن عند جميع الترددات المنخفضة.. وأيضًا يجب زيادة الجهد بدلاً من تثبيته عند الترددات المرتفعة بحيث لاتزداد المفاقيد عن المفاقيد المقننة.

وقد وجد أن هذه الزيادة في الجهد تكون بالمعدل الموضح في الشكل رقم (٧) حيث يبدأ الجهد عند التردد صفر بقيمة تساوي ١٠٪ من قيمة الجهد المقنن - بدلاً من الصفر - وبعض الأجهزة ترفع هذه القيمة إلى ٢٥٪ بشرط عدم الاستمرار في تشغيل المحرك عند التردد المنخفض ولكن فقط خلال فترة تعجيل المحرك عند بدء الدوران. أما منطقة الترددات المرتفعة فيجب فيها زيادة الجهد بحيث يزيد عن الجهد المقنن بنحو ٣٠٪ عند ضعف التردد المقنن (١٠٠ ذ/ث) بدلاً من تثبيت الجهد. وهذه المعدلات لتغير الجهد يمكن التحكم فيها بسهولة لأن مغيرات التردد تشتمل على معالج دقيق Micro Processor يبرمج حسب الحاجة.

ويوضح الشكل رقم (٨) تغير مفاقيد المحرك بتغير عزم الحمل عند الترددات المختلفة بهذه الزيادة في الجهود حيث مازالت المفاقيد الكلية أقل من القيمة المقننة التي يتحملها المحرك.. وإذا زاد الجهد عن ذلك فيخشى على المحرك من زيادة التشبع المغناطيسي عن المقنن عند الترددات المنخفضة كما يخشى على المحرك في الترددات المرتفعة من زيادة المفاقيد الميكانيكية.

وبهذا المعدل المطور لقيمة الجهد عند الترددات المختلفة تتحسن خواص المحرك كما بالأشكال أرقام (٩)-(١٣). و يكون العزم الأقصى ثابتًا عند جميع الترددات المنخفضة كما في الشكل رقم (٩).. وبرغم ذلك فإنه يمكن زيادة قيمة عزم الحمل الكامل عند الترددات المنخفضة كما في الشكل لأن المفاقيد الكلية مازالت أقل من المفاقيد المقننة. وفي الترددات المرتفعة زادت قيم العزم الأقصى وزادت قيم عزم الحمل الكامل عما كانت عليه في الشكل رقم (٤) حيث كان الجهد ثابتًا.

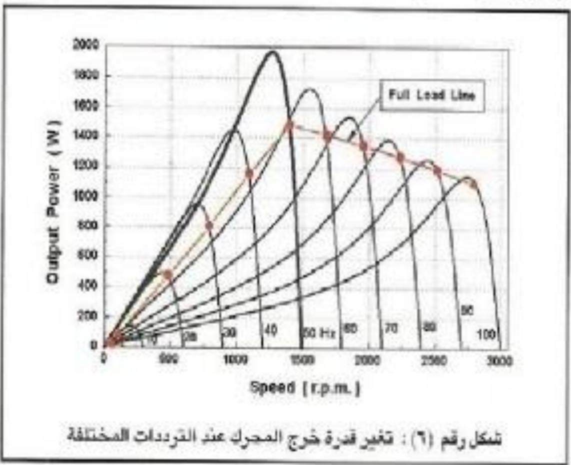
ويتغير تيار المحرك عند جميع الترددات كما في الشكل رقم (١٠) ويكون تيار الحمل الكامل أقل بقليل من القيمة المقننة.. أما تيار اللاحمل فيكون عاليًا عند الترددت المنخفضة ويتناقص بزيادة التردد.. كما تتغير قدرة خرج المحرك كما في الشكل رقم (١١) حيث أمكن تثبيت القيمة العظمى لقدرة الخرج وكذلك قيمة قدرة خرج الحمل الكامل عند القيمة المقننة وزيادتها عما كانت عليه في الشكل رقم (٧) عندما كان الجهد ثابتًا.

وتتغير كفاءة المحرك بتغير عزم الحمل عند الترددات المختلفة كما في الشكل رقم (١٢) حيث تكون كفاءة الحمل الكامل عالية عند الترددات المرتفعة بينما تتناقص عند الترددات المنخفضة. ويوضح الشكل رقم (١٣) تغير معامل القدرة للمحرك عند الترددات المختلفة.. وعند الحمل الكامل يكون معامل القدرة قريبًا من القيمة العظمى عند جميع الترددات.. وعند اللاحمل يتزايد معامل القدرة في الترددات العالية.

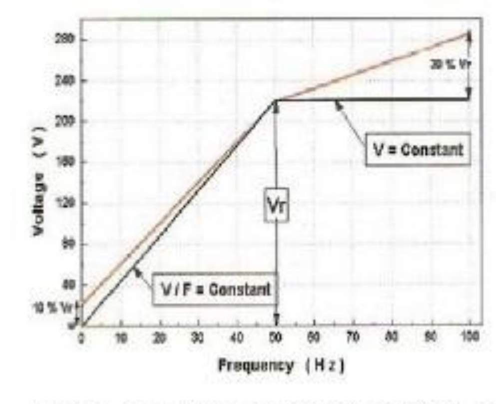
وباستخدام مغير التردد للتحكم في سرعة المحركات التأثيرية يلاحظ أن التحكم في السرعة يكاد يكون مثاليًا - حيث أصبح مدى تغير السرعة عريضًا جدًا - كما أن أي سرعة بينية مطلوبة بين أي سرعتين يمكن الحصول عليها بالحساسية والدقة العالية.



شكل رقم (٥): تغير تيارات دخل المحرك عند الترددات المختلفة



شكل رقم (٦): تغير قدرة خرج المحرك عند الترددات المختلفة



شكل رقم (٧) : التغير التقليدى للجهد مع التردد والتغير بزيادة الجهد

شكل رقم (٨) : تغير مفاقيد المحرك بزيادة الجهد عن التقليدى

تساؤلات من الخبرة العملية

١ ـــ ما هو عدد الأقطاب المناسب للمحرك الذي يستخدم معه مغير تردد للتحكم في السرعة؟

يرجع هذا التساؤل إلى أن المحرك ذي القطبين يمكنه الدوران بسرعة قرب ٦٠٠٠ لفة / دقيقة عند تردد ١٠٠ ذ/ث ..والمحرك ذي الأربعة أقطاب يمكنه الدوران بنفس السرعة عند تردد ٢٠٠ ذ/ث.. والمحرك ذي الستة أقطاب يدور بنفس السرعة عند تردد ٣٠٠ ذ/ث.. وهكذا. ويمكن لمغير التردد أن يعطي بسهولة ترددًا يتراوح بين الصفر وأكثر من ٤٠٠ ذ/ث. وعلى ذلك فإن أي محرك يمكن أن يدور بأية سرعة.. **فهل يفضل محرك على آخر عندما يختلف عدد الأقطاب؟** والإجابة.. نعم.. **يفضل محرك على آخر حسب طبيعة وحاجة الحمل..** وفي الشكل رقم (١٤) نجد أن عزم الحمل الكامل للأربعة محركات (٢ و٤ و٦ و٨ أقطاب) يكون بنفس القيمة في السرعات الأعلى من نحو ٢٨٠٠ لفة / دقيقة.. أما في السرعات الأقل فإن المحرك ذي الأربعة أقطاب يتحمل عزم حمل ضعف ما يتحمله المحرك ذو القطبين.. وكلما زاد عدد الأقطاب زادت قيمة العزم الذي يمكن تحميله على المحرك كما في الشكل. وعلى ذلك.. فإذا كان عزم الحمل كبيرًا في السرعات المنخفضة فيستخدم محرك بعدد أقطاب أكثر من اثنين حسب قيمة هذا العزم.. أما إذا كان عزم الحمل صغيرًا في السرعات المنخفضة ـــ مثل الحمل المروحي ـ فيفضل استخدام محرك ذي قطبين لأن كفاءته ومعامل قدرته تكون أكبر من باقي المحركات في السرعات العالية.

٢ ـ ما هو المحرك المناسب عندما نستبدل محرك تيار مستمر بمحرك تأثيري معه مغير تردد بهدف التخلص من مشاكل محركات التيار المستمر وتكاليف صيانتها العالية؟

في هذه الحالة.. إذا كان محرك التيار المستمر ذا سرعة مقننة في حدود ١٥٠٠ لفة / دقيقة.. فيتم اختيار محرك تأثيري ذا أربعة أقطاب بنفس القدرة.. لأن قيم أقصى عزوم للحمل تكون واحدة في الحالتين.. أما إذا كانت السرعة المقننة في حدود ٣٠٠٠ لفة / دقيقة لمحرك التيار المستمر فيكون المحرك التأثيري البديل ذا قطبين بنفس القدرة. وإذا كان محرك التيار المستمر ذا سرعة بين سرعتين تزامنيتين للمحرك التأثيري ـــ مثل ٢٠٠٠ لفة / دقيقة ـ فيكون المحرك التأثيري البديل ذا قطبين (ذا سرعة تزامن أعلى من سرعة محرك التيار المستمر) ولكن ذا قدرة أكبر من قدرة محرك التيار المستمر حتى يعطي نفس عزم محرك التيار المستمر.. وتكون الزيادة في قدرة المحرك التأثيري عن محرك التيار المستمر بنسبة سرعة التزامن ٣٠٠٠ / ٢٠٠٠ ـ أي مرة ونصف قدرة محرك التيار المستمر ـ وهكذا يمكن حساب قدرة المحرك البديل.

٣ ـ إذا كان الحمل يعمل عند سرعة ٣٠٠ لفة / دقيقة باستخدام محرك تأثيري ١٥٠٠ لفة / دقيقة مع صندوق تروس لخفض السرعة إلى ٣٠٠ لفة / دقيقة.. فهل يمكن الاستغناء عن صندوق التروس للتخلص من مشاكله واستخدام مغير التردد لخفض سرعة المحرك إلى ٣٠٠ لفة / دقيقة؟

هذا الاستبدال لا يمكن عمله إلا إذا تم استبدال المحرك بآخر قدرته أكبر بنسبة ١٥٠٠ / ٣٠٠ ـــ أي خمسة أضعاف ـ وذلك لأن صندوق التروس كان يزيد العزم بنسبة سرعة المحرك إلى سرعة الحمل.. أما باستخدام مغير التردد فإنه بخفض سرعة المحرك يبقى العزم الذي يمكن أن يعطيه للحمل بنفس القيمة التي كانت عند سرعة المحرك المقننة (١٥٠٠ لفة / دقيقة).

٤ ـــ هل يمكن استخدام المحرك التأثيري مع مغير التردد في المخارط والاستغناء عن صندوق التروس لتغيير السرعة؟

هذا الأمر لا يمكن تحقيقه إلا إذا تم استبدال المحرك بآخر ذي قدرة أعلى بنسبة سرعة المحرك إلى أقل سرعة في المخرطة للأسباب السابقة.

٥ ـ هل يمكن أن يعمل مغير التردد بحيث يعطي ثلاثة أوجه إذا فصل أحد خطوط دخل الثلاثة أوجه لمغير التردد؟

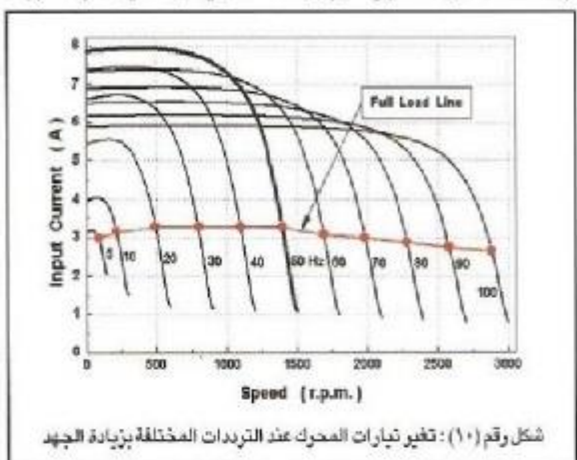
نعم.. تعمل معظم مغيرات التردد في هذه الحالة لأن جهد الثلاثة أوجه أو الخطين يتحول في بداية مراحل مغير التردد إلى تيار مستمر.. ثم يقطع إلى تيار متغير.. مع ملاحظة أن تيار الخطين سوف يزداد بنسبة ١,٣٢.. ولهذا فيجب أن تكون قنطرة التوحيد في مغير التردد مصممة لتحمل هذا التيار الزائد.. كما يلاحظ أن جهد الخرج سوف ينخفض إلى نحو ٧٠٪.

٦ ـ هل يمكن أن يعمل مغير التردد الذي يعطي ثلاثة أوجه على منبع ذي وجه واحد؟

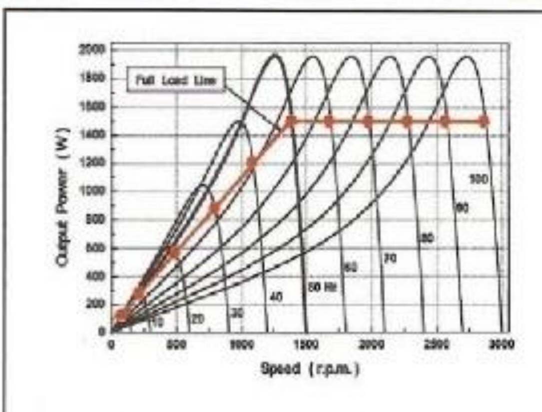
نعم يمكن ذلك في معظم أنواع مغيرات التردد.. مع ملاحظة أن جهد خط الثلاثة أوجه في الخرج سوف يساوي جهد دخل الوجه الواحد.. ومعظم مغيرات التردد تقبل العمل على منبع جهده أقل من الجهد المقنن بنسبة تصل إلى ٣٠٪.

٧ ـ هل يمكن تشغيل محرك الوجه

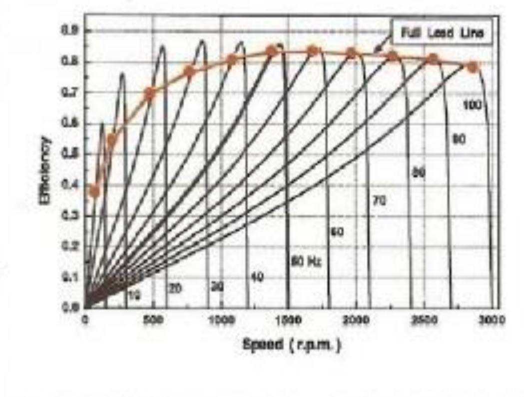
شكل رقم (٩) : تغير عزوم المحرك عند الترددات المختلفة بزيادة الجهد



شكل رقم (١٠) : تغير تيارات المحرك عند الترددات المختلفة بزيادة الجهد



شكل رقم (١١) : تغير قدرات خرج المحرك عند الترددات المختلفة بزيادة الجهد



شكل رقم (١٢) : تغير كفاءة المحرك عند الترددات المختلفة بزيادة الجهد

الواحد التأثيرى على مغير التردد؟

في هذه الحالة يجب دراسة الموضوع بدقة لكل نوع من محركات الوجه الواحد.. حيث يعمل النوع ذو القطب المظلل Shaded Pole على مغير التردد بنفس الأسلوب الذى تعمل به محركات الثلاثة أوجه.. أما النوع ذو الوجه المشطور Split Phase فإنه إذا تم تخفيض السرعة بخفض التردد عن ٥ - ٠ ذ/ث فإن مفتاح الطرد المركزى سوف يوصل ملفات البدء وسوف تحترق هذه الملفات. ونفس المشكلة تحدث مع المحرك ذى مكثف البدء Capacitor Start والمحرك ذى مكثف البدء مع مكثف دوران.. أما المحرك ذى مكثف الدوران Capacitor Run فإنه يحتاج إلى مكثف ذى سعة أكبر مع خفض التردد عن التردد المقنن.. كما يحتاج إلى مكثف ذى سعة أقل عند زيادة التردد عن المقنن.

٨ ــ هل يجب الالتزام بمعدل تغير الجهد مع تغير التردد الموضح سابقًا؟

يتم الالتزام بهذا المعدل عند الحاجة لتحميل المحرك حتى أقصى قيمة ممكنة للعزم والقدرة وذلك عندما يتغير الحمل على المحرك.. أما إذا كان الحمل من نوع واحد مثل الحمل المروحى فإنه يحتاج إلى عزم قليل في السرعات المنخفضة .. ويتزايد العزم مع زيادة السرعة. وفي هذه الحالة يفضل خفض الجهد عن هذا المعدل في السرعات المنخفضة وذلك لتحسين كفاءة المحرك ومعامل القدرة.

٩ ــ إذا كان محرك جهده ٦٠٠٠ ف يعمل على منبع ٣٨٠ ف باستخدام محول لرفع هذا الجهد.. هل يمكن استخدام مغير التردد في هذه الحالة؟

نعم.. إذ أن مغير التردد ـ جهد ٣٨٠ ف ـ يوضع قبل المحرك ويعمل بنفس الأسلوب كما لو كان المحرك والمحول وحدة واحدة تمثل محرك.

١٠ ـ عند استخدام مغير التردد مع المحرك التأثيرى ثلاثي الأوجه.. هل يحتاج المحرك لوسيلة بدء الحركة مثل مفتاح نجمة / دلتا أو ممانعات التوالى؟

لا يحتاج المحرك لوسيلة بدء الحركة لأنه يبدأ الدوران بتردد منخفض يتزايد إلى التردد المطلوب أتوماتيكيًا بمعدل تزايد يتم تحديده حسب الرغبة تبعًا لقدرة المحرك وعزم القصور الذاتى للمحرك والحمل.. وذلك باختيار قيمة زمن التسارع Acceleration Time ويتم زيادة التردد مع الزمن بمعدل خطى ثابت. وبعض الأجهزة يزيد فيها التردد بمنحنى على شكل حرف (S) وذلك لإحداث بدء ناعم.

١١ ـ هل يقوم مغير التردد بحماية المحرك من بعض المشاكل مثل زيادة الحمل؟

كل جهاز يجب أن يكون مزودًا بالحماية من زيادة التيار عن القيمة المقننة للجهاز ذاته.. ومعظم الأجهزة تتيح إمكانية تغيير قيمة أقصى تيار حسب تيار المحرك ذاته.. أما حماية المحرك من أية مشاكل أخرى فتتكفل بها أجهزة أخرى.

١٢ ـ ما هى الإمكانيات الإضافية التى يوفرها مغير التردد؟

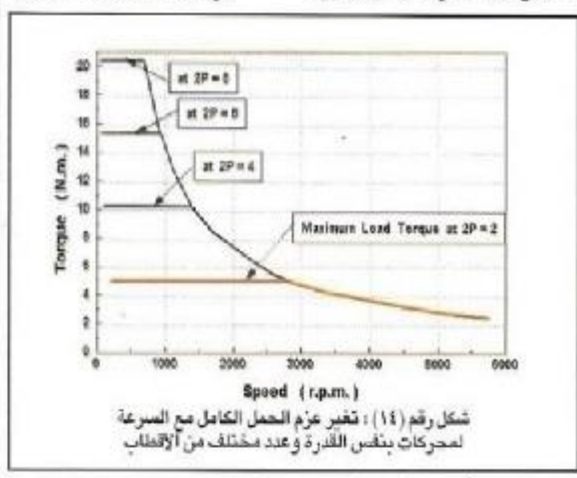
تختلف هذه الإمكانيات حسب نوع الجهاز. وهذه الإمكانيات مثل: إيقاف المحرك باستخدام الفرملة الذاتية بالتيار المستمر ــ إيقاف المحرك بإنقاص السرعة تدريجيًا بإنقاص التردد (Jog) ــ إمكانية إلغاء سرعة معينة أو مدى معين للسرعة لا يجب أن يدور بها المحرك حيث يحدث رنين ميكانيكى بسبب اهتزازات ميكانيكية عالية ـ اختيار قيمة التردد الأساسى حسب ما هو مقنن للمحرك ــ عكس اتجاه الدوان للمحرك ــ تثبيت جهد الخرج عند قيمة معينة مهما تغير جهد الدخل في حدود معينة ـ تغيير معدل تغير الجهد مع التردد وذلك طبقًا لطبيعة الحمل. وحديثًا تقوم بعض الاجهزة بتحسين خواص المحرك لكى يعطى أكبر عزم ممكن بأقل تيار حتى تتحسن الكفاءة ومعامل القدرة للمحرك وذلك بطريقة تسمى توجيه المجال المغناطيسى Field Oriented Control كما أن بعض الأجهزة الحديثة تشعر بقيمة العزم الميكانيكى المسلط على المحرك لتعطى جهدًا للمحرك يناسب هذا العزم وهذا الحمل. وعلى سبيل المثال إذا كان عزم الحمل صغيرًا فإن هذه الأجهزة تعطى جهدًا صغيرًا للمحرك وإذا زاد العزم يزداد الجهد.

١٣ ـ ما هى عيوب مغير التردد؟

تتمثل أهم عيوب مغير التردد في ارتفاع الثمن الذى يصل إلى نحو أربعة أمثال ثمن المحرك نفسه .. وكان منذ نحو عشر سنوات في حدود خمسة عشر ضعف ثمن المحرك.. وهو في هبوط مستمر مع زيادة التطور في مكونات المغير. وأما العيب الثانى فهو وجود توافقيات في جهد خرج المغير تؤدى إلى زيادة مفاقيد المحرك ورفع درجة حرارته مما يؤدى في بعض الأحيان إلى تحميل المحرك بحمل أقصاه أقل من القيمة المقننة للمحرك حيث تصل إلى نحو ٩٠٪.. ومع التطور في هذه المغيرات تتحسن الموجة أكثر وتقارب نسبة التحميل من الحمل الكامل للمحرك..

في العدد القادم:
التحكم في السرعة
مع توجيه المجال المغناطيسى

شكل رقم (١٣) : تغير معامل قدرة دخل المحرك عند الترددات المختلفة بزيادة الجهد



شكل رقم (١٤) : تغير عزم الحمل الكامل مع السرعة لمحركات بنفس القدرة وعدد مختلف من الأقطاب

Mohamed Mounir

التحكم فى سرعة المحركات الكهربية مع توجيه المجال المغناطيسى

د. فتحى عبد القادر
رئيس قسم الهندسة الكهربية وأستاذ الآلات الكهربية ـ هندسة شبين الكوم

تختلف المحركات الكهربية فى إمكانية وسهولة التحكم في سرعتها .. حيث تكون محركات التيار المستمر هي الأكثر سهولة فى التحكم بأقل التكاليف عن محركات التيار المتردد .. ولكن العيوب الرئيسية لمحركات التيار المستمر تتركز فى ارتفاع ثمنها وتكاليف صيانتها . ولهذا.. فقد بذلت محاولات متعددة فى صورة بحوث تطبيقية لجعل محركات التيار المتردد قابلة للتحكم فى سرعتها بدقة وحساسية عالية خلال مدى كبير للتغير فى السرعة.. وتم ذلك باستخدام مغيرات التردد Frequency Converters التى يتناقص ثمنها باستمرار مع التطور المطرد فى الصناعات الالكترونية.. الذى أدى إلى التغلب على مشكلة صعوبة التحكم فى سرعة هذه المحركات .. ولكن بقى عيب رئيسي فيها مقارنة بمحركات التيار المستمر تمثل فى زيادة التيارات بالنسبة للعزم الذى يعطيه المحرك.. مما يقلل من كفاءة المحرك ومعامل القدرة. وبمعنى آخر.. يلاحظ أن العزم T الذى يعطيه أى محرك مهما كان نوعه يتناسب مع كل من: مجال العضو الثابت Φ_s مجال العضو الدائر Φ_r جيب تمام الزاوية الزمنية بين مجال العضو الثابت ومجال العضو الدائر- $\cos\theta$ ـــ جيب الزاوية الفراغية بين مجال العضو الثابت ومجال العضو الدائر $\sin\beta$. أى أن $(T \alpha \Phi_s \Phi_r \cos\theta \sin\beta)$.. ومجال العضو الثابت Φ_s يتناسب مع تيار العضو الثابت .. ومجال العضو الدائر يتناسب مع تيار العضو الدائر. وفى محركات التيار المستمر تكون الزاوية الزمنية بين المجالين مساوية للصفر لأن المجال ناتج من تيار مستمر فتكون $\cos\theta=1$.. أما فى بعض أنواع محركات التيار المتردد فإن θ تكون أكبر من الصفر وبالتالى تكون $\cos\theta$ أقل من الواحد الصحيح مما يحتم زيادة أى من Φ_r أو Φ_s بزيادة التيار لنحافظ على نفس العزم .. كما أن الزاوية الفراغية β تكون ٩٠° درجة دائما فى محركات التيار المستمر فتكون $\sin\beta=1$ .. بينما تقل β عن ٩٠° فى حالة محركات التيار المتردد مما يؤدى إلى زيادة أخرى يجب تحقيقها فى المجالات والتيارات للمحافظة على نفس العزم.

ويتضح من الشكل رقم (١) اختلاف الزاوية الفراغية فى محركات التيار المستمر عن محركات التيار المتردد حيث يصنع محور مجال أقطاب العضو الثابت زاوية فى الفراغ مع محور أقطاب العضو الدائر مقدارها ٩٠° .. وتكون جميع الأقطاب ثابتة فى الفراغ ولاتدور. أما فى محركات التيار المتغير فإن الأقطاب الناتجة من كل من العضو الثابت والعضو الدائر تدور بسرعة تسمى سرعة التزامن سواء كان المحرك من النوع التزامني Synchro-nous أو من النوع التأثيرى Induc-tion- ودائما توجد زاوية فراغية بين محور أقطاب العضو الثابت ومحور أقطاب العضو الدائر أقل من ٩٠° .. وهذه الزاوية الفراغية معروفة فى المحركات التزامنية باسم زاوية الحمل Load Angle .. ومعروف أن هذه الزاوية تكون قريبة من الصفر عند اللاحمل وتتزايد بزيادة الحمل على المحرك وتصل إلى ٩٠° عند أقصى حمل..

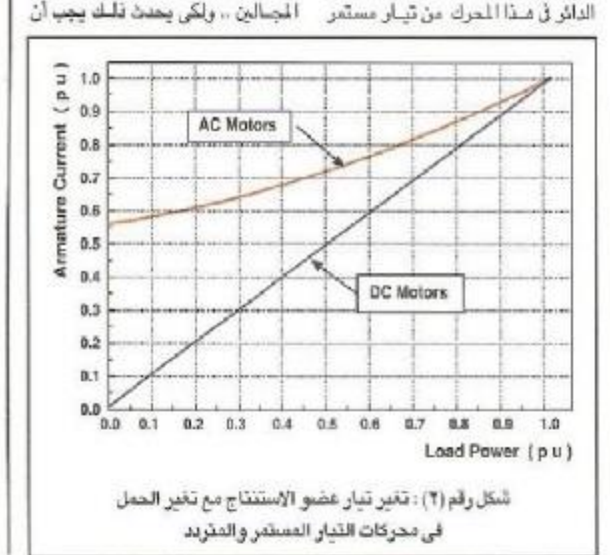
ونظراً لأن هذه الزاوية تتغير بتغير الحمل فى محركات التيار المتردد وتبقى ثابتة عند أفضل قيمة لها -٩٠° - فى محركات التيار المستمر .. فإن تيار عضو الاستنتاج فى محركات التيار المستمر يتزايد من الصفر خطياً بتزايد الحمل . وفى محركات التيار المتردد يكون التيار عالياً عند الأحمال الصغيرة ويتزايد بقيم أكثر مع زيادة الحمل كما فى الشكل رقم (٢).. وهذا مايعبر عنه بأن قيمة العزم للأمبير Torque/ Ampere فى محركات التيار المتردد تكون منخفضة عنها فى محركات التيار المستمر.. ولهذا تستخدم عدة منظومات لزيادة قيمة العزم للأمبير فى محركات التيار المتردد وذلك بجعل الزاوية الفراغية بين مجال العضو الثابت ومجال العضو الدائر ٩٠° باستمرار وعند أى قيمة للحمل على المحرك.. وهو مايسمي بالتحكم بتوجيه المجال المغناطيسى Field Oriented Control أو التحكم الاتجاهى Vector Control والذى يؤدى إلى إنقاص تيار المحرك وتحسين الكفاءة وزيادة قدرة الخرج. وسوف نوضح ذلك لكل من المحركات التزامنية والمحركات التأثيرية.

أولاً: التحكم بتوجيه المجال فى المحركات التزامنية

ينتج المجال المغناطيسى للعضو الدائر فى هذا المحرك من تيار مستمر ثابت القيمة ويناظر المجال المغناطيسى من أقطاب محركات التيار المستمر. أما العضو الثابت فى المحرك التزامنى فينتج عنه مجال دائرى تتوقف سرعته على تردد المنبع.. وهذا المجال الدائرى هو مجال لأقطاب تدور فى الفراغ.. ويمكن تسريع دورانها أو إبطاؤه بزيادة التردد أو إنقاصه.. كما يمكن تقديمها أو تأخيرها ببدء موجة التيار مبكراً أو تأخيرها .. وذلك تبعاً لوقت إشعال وحدات الثايرستور فى المغير Inverter.

ومن الدائرة المكافئة للمحرك التزامنى ورسم المتجهات الموضح فى الشكل رقم (٣).. نجد أن المحرك التزامنى عندما يعمل بحيث يكون تيار العضو الثابت I_a متقدمًا عن الجهد V بزاوية θ- الشكل رقم (٣ب)- وبإضافة هبوط الجهد فى مقاومة عضو الاستنتاج I_aR_a وهبوط الجهد فى الممانعة التزامنية X_a I_a على القوة الدافعة الكهربية E_a نحصل على جهد المنبع V.. وتكون E_a متقدمة عن اتجاه مجال الأقطاب Φ_r الناتج من تيار الأقطاب I_f بزاوية ٩٠° .. كما يتقدم الجهد V عن E_a زاوية δ.

ويلاحظ.. أن المجال المغناطيسى للعضو الثابت Φ_a يكون فى اتجاه تياره I_a.. والزاوية بينه وبين مجال العضو الدائر أقل من ٩٠° بمقدار $(\theta+\delta)$ وهذا هو العيب الرئيسى حيث يفضل أن تكون هذه الزاوية ٩٠° بين المجالين .. ولكى يحدث ذلك يجب أن



شكل رقم (٢): تغير تيار عضو الاستنتاج مع تغير الحمل فى محركات التيار المستمر والمتردد

Φ_s Φ_r Three Phase Induction Motor — D C Motor

شكل رقم (١): الزاوية الفراغية بين مجال العضو الثابت ومجال العضو الدائر فى محركات التيار المستمر والمتردد

يتأخر Ea بزاوية $(\theta+\delta)$.

كما أننا نجد أن عزم المحرك عند تيار Ia يساوى تماماً نفس العزم إذا كان Ia في اتجاه Ea ولكن بقيمة أقل مقدارها $I_a \cos(\theta+\delta)$. أي أنه بتحليل التيار Ia إلى مركبتين إحداهما في اتجاه Ea وهي التي تنتج العزم.. والثانية $I_a \sin(\theta+\delta)$ لاتنتج عزماً ولهذا يجب ملاشاتها حتى يقل Ia وتتحسن خواص المحرك. وفي الشكل رقم (٣جـ) إذا كان التيار Ia متأخراً عن الجهد بزاوية θ .. فإنه يتأخر عن Ea بزاوية $(\theta-\delta)$ وتكون مركبة التيار في اتجاه Ea هي $I_a \cos(\theta-\delta)$ - المركبة التي تحدث العزم - أما المركبة $I_a \sin(\theta-\delta)$ فيجب ملاشاتها لتحسين خواص المحرك.

وفي الشكل رقم (٣د) يكون التيار في اتجاه مثالي - في اتجاه Ea - ولاتوجد له مركبة عمودية على هذا الاتجاه.. ويكون التيار متأخراً عن V بزاوية δ مساوية للزاوية بين V وEa.. وهذا الوضع هو مايجب تحقيقه عند أي تردد وعند أي قيمة لعزم الحمل. ولكن.. ماذا يحدث في هذا الوضع إذا كان عزم الحمل ثابتاً ويقوم الجهاز بالمحافظة على أن يكون اتجاه Ia في اتجاه Ea. وتم انقاص تيار مجال العضو الدائر If ؟ في هذه الحالة سوف تقل Ea.. وحيث أن جهد المنبع V ثابتاً فإن كلاً من هبوط الجهد Ia ra و Ia Xs سوف يزداد وهذا يعني زيادة Ia. أي أنه إذا نقص If يعوضه Ia بالزيادة بنفس الأسلوب الذي كان يتم مع محركات التيار المستمر كما كان الهدف من هذه المنظومة.

ولكن.. كيف نحافظ على بقاء الزاوية بين مجال العضو الثابت ومجال العضو الدائر عند ٩٠° عند أية قيمة للحمل؟ بل وعند أي تردد لازم للحصول على سرعة معينة؟

هناك عدة طرق لتحقيق ذلك .. ففي الشكل رقم (٤) نجد أن محور الدوران للمحرك يركب به جزء خارج جسم المحرك يسمى Encoder. يعطى نبضات كهربية Pulses يتم التعرف منها على موضع أقطاب العضو الدائر.. وهذا الجزء. توجد منه عدة أنواع مثل النوع الذي يعمل بتأثير ضوء لمبة يركب في مكان ثابت ويتحرك أمام هذا الضوء قرص مثبت في محور الدوران به ثقوب تقع أمام أقطاب العضو الدائر.. وعند وصول الثقب لوضع ضوء اللمبة يمر الضوء عبر ثقب القرص إلى الجهة الثانية منه ليسلط على صمام ثنائي ضوئي Photo Diode أو ترانزستور ضوئي Photo Transistor فتحدث نبضة كهربية تستخدم لتعيين موضع أقطاب العضو الدائر وبالتالي تحديد زمن بدء تيارات العضو الثابت بحيث يصنع مجال العضو الثابت زاوية ٩٠° مع مجال العضو الدائر.

ويوجد Encoder من نوع آخر يستخدم المجال المغناطيسي بدلاً من الضوء حيث يثبت بالقرص شريحة حديدية رقيقة تكمل الدائرة المغناطيسية لملف ثابت في الفراغ بدلاً من اللمبة والترانزستور الضوئي.. وتحدث نفس النبضة الكهربية الدالة على موضع أقطاب العضو الدائر.

ولكي يتم تحديد زمن بدء تيارات العضو الثابت.. فيلاحظ أنه إذا أردنا إمرار تيار معين بزاوية زمنية معينة في كل وجه من أوجه العضو الثابت.. فيجب أن نحدد أولاً قيمة كل مقاومة وقيمة كل ممانعة ثم نحسب الجهد اللازم لإمرار التيار المطلوب بقيمته وزمنه.. حيث تذهب هذه النتيجة كنبضات لإشعال ثايرستورات دائرة التوحيد Converter - شكل رقم (٤) - وذلك لتحديد قيمة جهد التيار المستمر الذي يؤثر على قيمة جهد التيار المتغير الخارج من المغير Inverter.. كما تذهب نتيجة الحسابات أيضاً كنبضات لإشعال ثايرستورات المغير في الزمن المحسوب لتحديد زمن تيار كل وجه وبالتالي زمن وموضع مجال العضو الثابت.

وعلى ذلك.. فإن Encoder يقوم بعملية تغذية خلفية Feed Back للمنظومة وبالتالي يحدد موضع مجال أقطاب العضو الثابت لتبقى دائماً صانعة زاوية ٩٠° مع مجال العضو الدائر.

ولكن.. ماهي قيمة عزم المحرك؟ هناك خطأ شائع يقول إن عزم المحرك يتحدد بتحديد قيمة أمر العزم Torque Command - شكل رقم (٤) - يمثل ماتحدد به أي جهد أساسي Reference Voltage في أي دائرة تحكم .. وبزيادة قيمة أمر العزم يزيد جهد المحرك وتياره وبالتالي عزمه وهذا كله خطأ لأن العزم الذي يعطيه المحرك يحدده الحمل الميكانيكي فقط ومهما زاد أو نقص جهد المحرك يبقى عزم المحرك مساوياً لعزم الحمل. ولو كان عزم الحمل ثابتاً مثلاً ثم زاد الجهد.. فإن التيار ومجال العضو الثابت سوف يزدادان ولكن تتغير الزاوية بين مجال العضو الثابت ومجال العضو الدائر بحيث يبقى عزم المحرك ثابتاً لثبات عزم الحمل.

وعلى ذلك .. فالذي يحدث في هذه المنظومة إذا زاد عزم الحمل أن يقوم جهاز قياس العزم Torque Transducer الذي يركب على محور الدوران بين المحرك والحمل بقياس عزم الحمل الجديد وإعطاء إشارة كهربية بذلك وهي إشارة أمر العزم Torque Command التي تعتبر كتغذية خلفية للمنظومة ليعالج الزيادة في العزم بتعديل قيم الجهود والتيارات والزوايا الزمنية للتيارات وبالتالي يحافظ على بقاء الزاوية بين مجال العضو الثابت والعضو الدائر ٩٠°.. إلا أنه يفضل الاستعاضة عن جهاز قياس العزم - لأنه جزء ميكانيكي كهربي يحتاج إلى صيانة ومشاكله كثيرة - باستخدام محول تيار Current Transducer يعبر عن قيمة تيار المحرك.. وبالتالي فإنه بتغير العزم على المحرك يتغير التيار وتتغير الزاوية بين المجالين عن ٩٠° .. وتقوم إشارة محول التيار وإشارة Encoder بتعديل الزاوية إلى ٩٠°.

وحديثاً ..تم أيضًا الاستغناء عن Encoder بحساب قيمة الزاوية بين المجالين بدلاً من قياسها بواسطة Encoder وذلك حتى يتم الاستغناء عن هذا الجزء الميكانيكي الكهربي لمشاكل الصيانة اللازمة له .. وتصبح المنظومة في هذه الحالة بدون حساسات Sensorless.

ولكي تتم كل هذه العمليات الحسابية بدقة خصوصًا وأنها تجري باستمرار طوال فترة تشغيل المحرك - أي والمحرك موصل بالمنبع الكهربي On Line - فإن ذلك يتطلب معرفة جميع مقاومات وممانعات المحرك .. ليس فقط مرة واحدة خلال بداية تشغيل المنظومة .. ولكن يجب قياسها دائمًا وباستمرار لأنها تتغير بتغير عزم وسرعة وجهد المحرك.. ولهذا يتم قياسها بالحساب من قياسات تجرى على المحرك وهو On Line.. وكذلك بالاستعانة ببيانات المحرك التي تغذى المنظومة مرة واحدة عند التشغيل لأول مرة مع أي محرك. ويمكن الاستفادة من معرفة قيمة Ea وزاويتها بالقياس بواسطة ملف صغير Search Coil لكل وجه أو حساب هذه القيم عندما تكون المنظومة بدون حساسات.

وهذه المنظومة مع تعقيدها الشديد في العمليات الحسابية وبرمجتها.. إلا أن معالجتها تتم بسرعة عالية جدًا وذلك للتطور في سرعة الحاسبات الدقيقة ووجود بدائل للثايرستور أكثر استجابة وتتحمل العمل بترددات عالية جدًا.

والمعروف أن الثايرستور التقليدي يتحمل ترددات حتى ١ ك هرتز .. والثايرستور من نوع GTO يتحمل حتى ٢ ك هرتز .. والترانزستور من نوع MCT يتحمل حتى ١٠ك هرتز.. والترانزستور من نوع BJT أو IGBT فيتحمل ٢٠ ك هرتز.. والترانزستور من نوع MOSFET يتحمل حتى ١٠٠٠ ك هرتز.

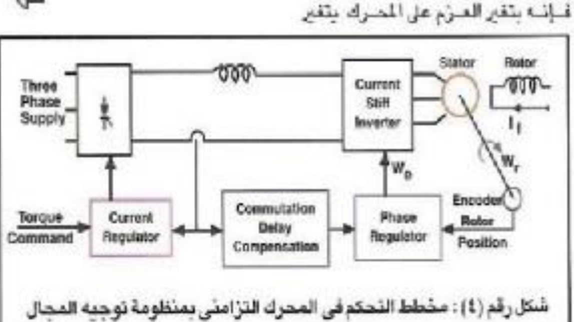
شكل رقم (٣) : الدائرة المكافئة ورسم المتجهات للمحرك التزامني

(a) Equivalent Circuit

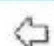
(b) Lead Power Factor

(c) Lag Power Factor

(d) Ideal Power Factor



شكل رقم (٤) : مخطط التحكم في المحرك التزامني بمنظومة توجيه المجال



ثانياً: التحكم بتوجيه المجال في المحركات التأثيرية

يجب أن تتحقق نفس الأهداف التى تحققت بتوجيه المجال فى المحركات التزامنية بتوجيه المجال فى المحركات التأثيرية .. إلا أن هناك اختلافات جوهرية بين المحركين تؤدى إلى صعوبة الحسابات أكثر فى المحركات التأثيرية لأن الأقطاب فى العضو الدائر فى المحرك التزامنى يكون موضعها ثابتاً بالنسبة لجسم العضو الدائر أما فى المحرك التأثيرى فإن أقطاب العضو الدائر تدور بالنسبة لجسم العضو الدائر بسرعة تتوقف على قيمة الانزلاق Slip التى تتغير بتغير الحمل .. وبالتالى فإن أى Encoder يركب على عمود الدوران لايستطيع تحديد موضع أقطاب العضو الدائر مباشرة .. ولكن بمعرفة السرعة– بالقياس أو بالحساب– ومعرفة التردد وعدد أقطاب وزمن التشغيل يمكن حساب موضع أقطاب العضو الدائر . كما أن عدد أقطاب العضو الدائر.. فى المحرك التأثيرى تستنتج من أقطاب العضو الثابت . أما فى المحرك التزامنى.. فإن أقطاب العضو الدائر تكون مستقلة عن أقطاب العضو الثابت.. ولهذا فإنه إذا تم تقديم أو تأخير أقطاب العضو الثابت فى المحرك التأثيرى فإن أقطاب العضو الدائر تتبعها تقديما وتأخيرًا .. فكيف إذن يتحقق توجيه مجال العضو الثابت فى المحرك التأثيرى بحيث يصنع زاوية ٩٠° مع اتجاه مجال العضو الدائر وتكون أقل من ٩٠° فى المحرك التأثيرى العادى بدون توجيه للمجال؟

نجد أن منحنى التعويق المغناطيسى Hysteresis Loop لرقائق حديد العضو الدائر يكون ذا عرض أو اتساع معين يجعل تغير أقطاب العضو الدائر يتأخر بزمن يعادل زاوية زمنية تساوى عرض منحنى التعويق المغناطيسى وبمعنى آخر.. فإن كثافة مجال العضو الدائر B لاتكون فى نفس الاتجاه الزمنى لشدة مجال العضو الدائر H ..بل تتأخر عنها بزاوية تساوى عرض منحنى التعويق المغناطيسى . كما أن ثابت الزمن Time Constant للعضو الدائر يؤدى إلى تأخر H للعضو الدائر عن H للعضو الثابت مما يضيف تأخراً ثانياً لكثافة مجال العضو الدائر B. وهذا التأخر كله يتيح إمكانية تحريك أقطاب العضو الثابت تقديماً وتأخيرًا دون أن تتمكن أقطاب العضو الدائر من اللحاق بها فى نفس اللحظة. وبذلك نتمكن من إيجاد الزاوية ٩٠° والمحافظة على قيمتها عند أى سرعة وأية حمل .. بعمليات قفز لمجال العضو الثابت تتم بسرعة عالية جدًا.

وتتضح قيمة الزاوية بين المجالين فى ظروف التشغيل المختلفة للمحرك التأثيرى من الدائرة المكافئة ورسم المتجهات للمحرك فى الشكل رقم (٥).. حيث يكون اتجاه مجال العضو الثابت Φ_s فى اتجاه تيار المغنطة I_m ويكون اتجاه مجال العضو الدائر Φ_r فى اتجاه تيار العضو الدائر I_2 أو I'_2 .. والزاوية بين Φ_r,Φ_s لاتساوى ٩٠° .. ولكى تكون ٩٠° يجب أن يكون I_2 فى اتجاه القوة الدافعة الكهربية للعضو الدائر E_2 وهو مالا يتحقق أبدًا فى الحالة المستقرة Steady State للمحرك لوجود مقاومة وممانعة للعضو الدائر.. ولكن تتحقق فقط فى الحالات الانتقالية Transient للمحرك وذلك بتقطيع التيار إلى نبضات عرضها صغير بحيث تتكون نصف الموجة من مجموعة من النبضات.

ويلاحظ أن تيار العضو الثابت فى هذه الحالة يتكون من تيار المغنطة I_m فى اتجاه مجال العضو الثابت.. وتسمى هذه المركبة باسم أمر المجال Flux Command. والتيار الثانى هو التيار I'_2 المناظر لتيار العضو الدائر I_2 عندما يكون فى اتجاه E_2.. ويسمى هذا التيار باسم مركبة العزم أو أمر العزم Torque Command.

وفى الأحوال العادية– بدون توجيه المجال– تكون الزاوية بين Φ_r,Φ_s صغيرة عند بدء دوران المحرك ثم تتزايد كلما زادت السرعة . لهذا .. فإنه يمكن زيادة عزم بدء الدوران للمحرك بأكثر من ٣٠٠٪ مع توجيه المجال عن عزم البدء بدون توجيه المجال .وتتناقص هذه الزيادة مع زيادة سرعة المحرك حيث تصل زيادة عزم الحمل الكامل مع توجيه المجال إلى ٢٠٪ من عزم الحمل الكامل بدون توجيه المجال.

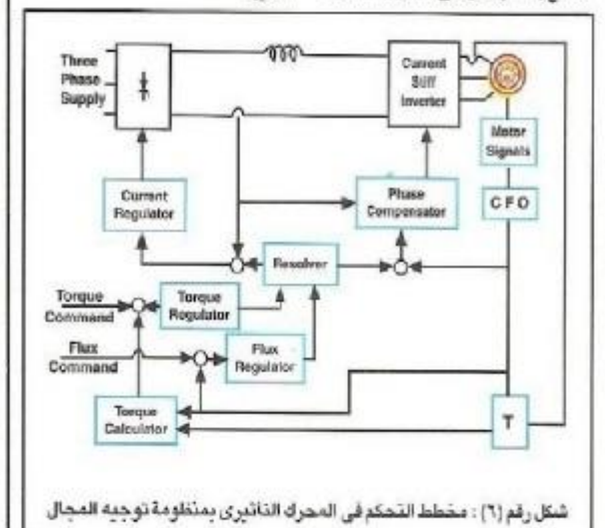
التحكم فى السرعة مع التحكم المباشر فى العزم

يعتبر هذا الأسلوب هو الأحدث من نوعه للتحكم فى سرعة محركات التيار المتردد بتغيير التردد مع توجيه المجال المغناطيسى لتصبح الزاوية الفراغية بين مجال العضو الثابت والعضو الدائر ٩٠° للحصول على أكبر قيمة لنسبة العزم إلى الأمبير.. وبالتالى تحسين كفاءة المحرك وزيادة عزوم البدء وقدرة خرج المحرك.

وهذا التحكم المباشر فى العزم Direct Torque Control يهدف إلى تحقيق نفس الأهداف والمزايا التى تحصل عليها بتحقيق توجيه المجال المغناطيسى التى سبق الإشارة إليها فى المحركات التزامنية والمحركات التأثيرية .. إلا أن هذا الأسلوب DTC أبسط كثيراً من الأسلوب السابق لأنه أصبح بدون Encoder لقياس موضع العضو الدائر وبدون جهاز قياس سرعة العضو الدائر .. ويقوم بإجراء حسابات حالة المحرك بدقة عالية لأنه يقوم بمقارنة الحالة الفعلية للمحرك مع الحالة المحسوبة ويعدل أزمنة التوصيل والفصل فى المغير Inverter بسرعة عالية ... وذلك بفضل التوصل لمعالج إشارات رقمى Digital Signal Processor يعمل ببرامج تقوم بتحديث حسابات حالة المحرك باستمرار بعدد من المرات يصل إلى ٤٠ ألف مرة فى الثانية الواحدة. ونتيجة لهذا التحديث المستمر فى حسابات حالة المحرك ومقارنتها بحالته الفعلية .. فإن المنظومة تقوم باستمرار باختيار أفضل عمليات فصل وتوصيل فى المغير Inverter. وتستطيع أن تستجيب وتتفاعل مع أية تغيرات سريعة أو مفاجئة فى الحمل الميكانيكى للمحرك أو أية تغيرات فى جهد المنبع الكهربى الرئيسى.

وتقوم منظومة DTC بالتحكم وضبط قيمة مركبة المجال Flux Component ومركبة العزم Torque Component لتيار العضو الثابت فى المحرك تبعاً لقيمة عزم الحمل والسرعة المطلوبة.

يبين الشكل رقم (٧) الأجزاء الرئيسية لجهاز بمنظومة التحكم المباشر فى العزم.. وفيه يتم قياس تيار خطين من الخطوط الثلاثة للمحرك.. كما يتم قياس جهد أو تيار خط التيار المستمر والتعرف على أوضاع التوصيل والفصل فى المغير. ويتم تغذية الجهاز فى بداية تشغيله لأول مرة مع المحرك ببيانات المحرك المقننة من جهد وتيار وسرعة وتردد وقدرة خرج . ويقوم الجهاز بالعمل مع المحرك مرة واحدة –فى أول مرة– للتعرف على مقاومات وممانعات ومعاملات المحرك وهذا التشغيل يسمى Auto Calibration أو Parameters Identification . وهكذا.. تكتمل بيانات النموذج الرياضى للمحرك Adaptive Motor Model . ومن مقارن العزم Torque Comparator ومقارن المجال Flux Comparator تصدر أوامر الفصل والتوصيل فى المغير.



شكل رقم (٦) : مخطط التحكم فى المحرك التأثيرى بمنظومة توجيه المجال

شكل رقم (٥) : الدائرة المكافئة ورسم المتجهات للمحرك التأثيرى

تساؤلات عملية

١ ـ هل توجد بالسوق المحلى أجهزة تعمل بمنظومة التحكم فى السرعة مع توجيه المجال المغناطيسى؟

– نعم توجد أجهزة من إنتاج شركات متعددة عالمية تعمل بمنظومة توجيه المجال بطريقة التحكم المباشر فى العزم DTC .. وأخرى تعمل بطريقة التحكم الاتجاهى Vector Control .. كما يوجد نوع ثالث يغير سرعة المحركات بتغيير التردد ولكنه يغير من قيمة المجال فقط دون أن يغير اتجاه المجال، ويسمى التحكم فى هذه الحالة بالتحكم القياسى Scalar Control.

٢ ـ ما هي الفروق الجوهرية بين الأنواع الثلاثة لأجهزة التحكم فى السرعة بتغيير التردد؟

– أبسط هذه الأنواع هو مغير التردد القياسى Scalar ويطلق عليه عادة Frequency Converter . وقد سبق دراسة هذا النوع فى العدد السابق من «الكهرباء العربية» .. وهو يعتبر مجرد منبع متغير التردد بجهود تناسب كل تردد .. ولتشغيله مع أى محرك فإننا لانعرف الجهاز بأية بيانات عن المحرك . ولكن فقط يجب أن يكون تيار المحرك مناسباً لأكبر تيار يتحمله الجهاز . ويمكن تشغيل أى محرك بتيارات أقل دون أن نعدل أى شىء فى الجهاز بل يمكن تشغيل أكثر من محرك على الجهاز بشرط أن يتحمل الجهاز مجموع تيارات هذه المحركات . وتتركزعيوب هذا النوع فى عدم تحسين خواص الأداء للمحرك عن حالة عمل المحرك مع المنبع الكهربى العادى.. بل إن خواص المحرك تسوء بعض الشىء لوجود توافقيات . وفى هذا النوع تتكون موجة الجهد بمنظومة تعديل عرض النبضة Pulse Width Modulation.

أما النوع الثانى من هذه الأجهزة والمزود بمنظومة توجيه المجال بطريقة Vector Control .. ففيه يجب تعريف الجهاز بكل بيانات المحرك بدقة مثل التيار والسرعة والقدرة عند الحمل الكامل والجهد والتردد المقنن . ولا يمكن تشغيل أكثر من محرك فى نفس الوقت على الجهاز. وإذا أريد استبدال المحرك بآخر.. يجب تعريف الجهاز ببيانات المحرك الجديد. ويتميز هذا النوع بأنه يحسن خواص المحرك عن تلك التى تكون مع التشغيل على المنبع الكهربى العادى .. حيث يقل التيار وتتحسن الكفاءة ومعامل القدرة ويزداد عزم الحمل الكامل الذى يمكن تحميله على المحرك كما يزداد عزم بدء الدوران. وفى هذا النوع أيضاً تتكون موجة الجهد عادة بمنظومة تعديل عرض النبضة PWM.

ويحقق النوع الثالث ــ التحكم المباشر فى العزم DTC – مزايا النوع الثانى ولكنه يفضله فى أنه أكثر بساطة فى التشغيل وأسرع استجابة للتغيرات المفاجئة فى الحمل وجهد المنبع. ويعطى المحرك السرعة المطلوبة بدقة عالية تقل نسبة الخطأ فيها إلى ٠,١٪ . وهناك اختلاف جوهرى عن النوع الثانى يتمثل فى أن موجه الجهد لخرج الجهاز لاتتكون بمنظومة PWM بل بعمليات توصيل وفصل لوحدات ترانزستور من نوع IGBT.

٣ ـ ما هى قيمة الجهد عند الترددات المختلفة للأنواع الثلاثة من هذه الأجهزة؟

ـ فى النوع الأول "Scaler" تكون النسبة ثابتة بين الجهد والتردد = V/F Constant ـ خلال الترددات الأقل من التردد المقنن ـ ويمكن أن يزيد الجهد أو يقل قليلاً عن ذلك تبعاً لنوع الحمل من حيث احتياجه إلى عزم كبير أو صغير عند هذه الترددات المنخفضة . وخلال الترددات المرتفعة تظل قيمة الجهد عند قيمة الجهد المقنن أو تزيد قليلاً كما سبق بيانه فى العدد السابق من «الكهرباء العربية».

أما فى النوعين الثانى والثالث.. فإن تيار المغنطة Flux Command يجب أن يكون ثابتا عند قيمته المقننة خلال جميع الترددات الأقل من التردد المقنن وذلك حينما يحتاج الحمل لعزم كبير مساو لعزم الحمل الكامل خلال هذه الفترة. إما إذا كان الحمل يحتاج لعزم منخفض مثل الحمل المروحى.. فإن مركبة تيار المغنطة يجب أن تقل بمعدل يناسب كل نوع من الأحمال الميكانيكية على المحرك. وخلال الترددات الأعلى من التردد المقنن يجب أن يتناقص تيار المغنطة حتى لاتزداد مفاقيد الحديد وبالتالى مفاقيد نحاس العضو الثابت للمحرك. ويناظر معدل التناقص هذا مثيله فى تيار المجال لمحركات التيار المستمر عندما تعمل بسرعة أعلى من السرعة المقننة .. كما يناظر أيضاً معدل تناقص تيار المغنطة عند الترددات المرتفعة فى الأجهزة من النوع الأول "Scaler".

أما تيار العزم Torque Command فإنه يقترب من الصفر عند اللاحمل لجميع الترددات ويتزايد خطياً مع زيادة عزم الحمل. إلا أن معدل الزيادة الخطية تكون قليلة فى السرعات المنخفضة وكبيرة فى السرعات العالية لتعويض نقص تيار المغنطة. والتيار الكلى للمحرك يساوى الجذر التربيعى لمجموع مربع تيار المغنطة ومربع تيار العزم.

٤ ــ هل يمكن أن يعمل الجهاز بطريقة خاطئة تؤدى إلى إساءة خواص المحرك؟

– النوع الأول – ذو المجال القياسى "Scaler" – لايعمل بطريقة خاطئة مادام جهده وقدرته مناسبين لجهد وقدرة المحرك . ويمكن استبدال المحرك الكبير بآخر صغير أو بمجموعة محركات صغيرة مجموع قدراتها تساوى قدرة الجهاز. أما فى النوعين الثانى "Vector Control" والثالث "DTC" فإن الجهاز يمكن أن يعمل بطريقة خاطئة تؤدى إلى زيادة التيار ونقص الكفاءة ومعامل القدرة وعزوم المحرك .. وذلك إذا حدث خطأ فى إعطاء بيانات المحرك للجهاز. وأكثر البيانات حساسية لهذا الخطأ هى سرعة المحرك المقننة التى يجب إعطاؤها بالضبط كما هو مدون بلوحة بيانات المحرك. وإذا كان الخطأ كبيراً فإن الجهاز سوف يفصل نتيجة زيادة التيار Over Current. ولهذا .. فإن هذين النوعين من الأجهزة لايعمل أى منهما على أكثر من محرك واحد.

٥ ـ كيف نستدل على أن الجهاز من النوع الثانى أو النوع الثالث يعمل بطريقة صحيحة؟

ــ أبسط طريقة لذلك.. هى تشغيل المحرك من المنبع العادى ــ ٥٠ ذبذبة/ ثانية ـ وقياس سرعته وتياره عندما يكون محملاً بالحمل الكامل أو أقل قليلاً – وليس أثناء اللاحمل – ثم إعادة تشغيل المحرك من الجهاز وضبط سرعته على نفس السرعة عندما كان يعمل على المنبع العادى .. ثم قياس التيار والمحرك محملاً بنفس الحمل حيث يجب أن يكون هذا التيار أقل من التيار فى حالة التشغيل على المنبع العادى. ويلاحظ هنا.. أن نقص التيار يكون محدوداً جداً وغير ملحوظ إذا كان المحرك عند اللاحمل.. لأن المجالين يكونان متعامدين عند اللاحمل.. سواء عمل المحرك التأثيرى على المنبع العادى أو مع أى من الجهازين.

٦ ــ هل يعمل أى جهاز على أى من المحركين التزامنى أو التأثيرى؟

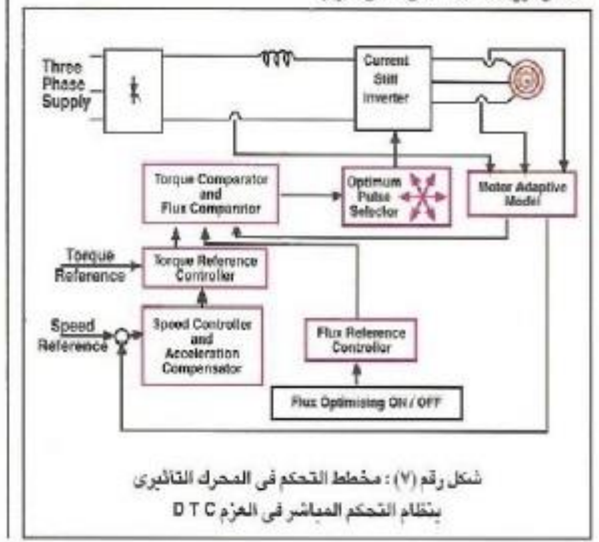
ــ يعمل النوع الأول على أى من المحركين بدون أى مشاكل .. أما النوعين الثانى و الثالث فيعملان فقط على نوع واحد من المحركات لأن حسابات الجهاز لخواص الأداء للمحرك التزامنى تختلف عن حساب خواص الأداء للمحرك التأثيرى . وهذه الخواص يتم حسابها باستمرار طوال فترة تشغيل المحرك لتصحيح قيم تيار المجال وتيار العزم . ونظراً لأن بعض الأجهزة مزودة ببرامج حسابات المحرك التزامنى وبرامج حسابات المحرك التأثيرى .. فيجب اختيار نوع المحرك من خيارات الجهاز .. كما أن بعض الأجهزة الحديثة مزودة بخيار آخر يتيح تشغيل الجهاز بـ "Scalar Control" أو "DTC".

٧ ــ هل تكون شروط اختيار عدد أقطاب المحرك ــ أو شروط استبدال محرك التيار المستمر بمحرك يعمل بهذا الأسلوب .. أو شروط تغيير محرك سرعة واحدة معه صندوق تروس بمحرك يعمل بهذا الأسلوب .. هى نفس الشروط عندما يعمل المحرك مع جهاز من النوعين الثانى أو الثالث؟

–نعم تنطبق نفس الشروط.

العدد القادم:

البدء الناعم وموفرات الطاقة



شكل رقم (٧) : مخطط التحكم فى المحرك التأثيرى بنظام التحكم المباشر فى العزم D T C

البــدء النـاعـم للمحركـات الكهربيــة

Soft Starting

د. فتحي عبد القادر
رئيس قسم الهندسة الكهربية وأستاذ الآلات الكهربية ـ هندسة شبين الكوم

قديماً.. كانت عمليات بدء الدوران على المحركات الكهربية تتم بهدف إنقاص تيار المحرك إلى قيمة تتحملها ملفاته ــ لأن تيار البدء في المحركات التأثيرية يزيد على خمسة أضعاف تيار الحمل الكامل بينما يزداد تيار البدء عن عشرين ضعف تيار الحمل الكامل في محركات التيار المستمر. وكان يتم إنقاص التيار على مرحلتين أو ثلاث.. وكانت تحدث صدمات ميكانيكية مفاجئة على محور دوران المحرك والحمل وكذلك على وسيلة الربط الميكانيكية بين المحرك والحمل سواء كانت مباشرة أو باستخدام تروس أو سيور.. مما كان يستلزم زيادة حجم محور الدوران والتروس والسيور.

ومع التطور الكبير في تصنيع المكونات الالكترونية.. أصبح من السهل التحكم في تيار بدء المحركات ليس على مرحلتين أو ثلاث مراحل.. بل بمعدل تغير طفيف يؤدى إلى بدء ناعم بالقيمة المطلوبة.. ليس للتيار فقط وإنما أيضًا للعزم وبمعدل تغير يناسب طبيعة كل حمل بحيث لا يؤدى إلى أية صدمات ميكانيكية أو كهربية. وتستخدم لذلك حاليًا أجهزة تسمى بأجهزة البدء الناعم Soft Starters .. توصل بين المنبع الكهربى والمحرك كما في الشكل رقم (١).. ولهذا فإن طرق البدء القديمة تعتبر طرق بدء قاسية Hard Srarting.

ويحقق استخدام جهاز البدء الناعم المزايا التالية:

١ ــ إنقاص مخاطر الصدمات الميكانيكية على محور الدوران لكل من المحرك والحمل وكذلك على تروس أو سيور النقل من المحرك إلى الحمل مما يزيد من عمرها.

٢ ـ إنقاص تيار البدء إلى قيمة تتحملها ملفات المحرك.

٣ ـ المحافظة على ثبات جهد الشبكة الكهربية لأن تيار البدء العالى يؤدى إلى خفض جهد الشبكة مما يسبب مشاكل لبقية الأحمال.

٤ ـ إنقاص المخاطر الناتجة عن تيار البدء العالى في محول التوزيع الذى يعمل عليه المحرك.

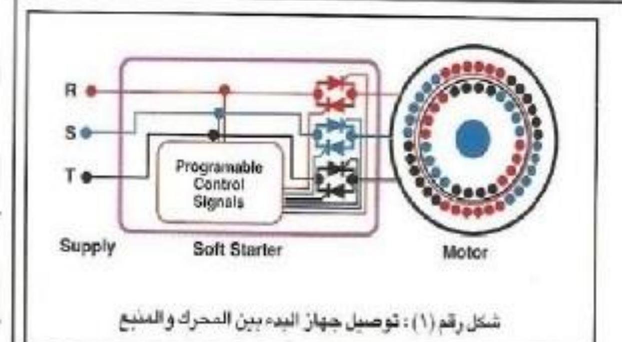
٥ ـ توفير الطاقة الكهربية خلال فترات البدء ــ ويمكن لبعض أجهزة البدء الناعم توفير الطاقة طوال فترات تشغيل المحرك.

٦ ــ إنقاص مخاطر التموج في زيادة ونقص التيار والجهد للأحمال والشبكة عند تشغيل الكباسات الترددية.

٧ ــ استخدام مساحة مقطع صغير للكابلات المتصلة من الشبكة إلى المحرك.

٨ ــ باستخدام طريقة بدء بمفتاح (نجمة / دلتا) نحتاج إلى كابلين كل منهما ثلاثة أطراف من المحرك حتى المفتاح.. ولكن باستخدام جهاز البدء الناعم نحتاج إلى كابل واحد ثلاثة أطراف.

٩ ـ إنقاص الصدمات الهيدروليكية على كل من الطلمبة والأنابيب التى تنقل السوائل.



شكل رقم (١): توصيل جهاز البدء بين المحرك والمنبع

١٠ ـ منع الصدمات الفجائية أثناء رفع الأحمال بالأوناش.

١١ ـ منع تحرك أو انسكاب المواد التى تنقل بواسطة سيور نقل.

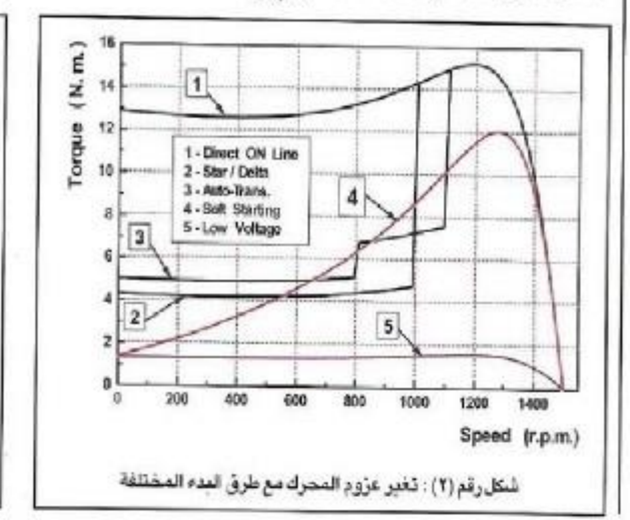
١٢ ـ نادرًا ما يحتاج جهاز البدء الناعم للصيانة.. لأنه لايحتوى على أجزاء متحركة.

ويرجع حدوث البدء القاسى وما يتبعه من صدمات ميكانيكية وكهربية.. إلى أنه عند توصيل المحرك بالمنبع الكهربى ينشأ فورًا عزم من المحرك يكون أكبر بكثير من العزم الذى يحتاجه الحمل.. وبالتالى تنشأ قوة دفع تعجل دوران الحمل تتبعها صدمات ميكانيكية.. ويكون التيار الكهربى بقيمة عالية فجائية تسبب تذبذبات كهربية في الجهود والتيارات.

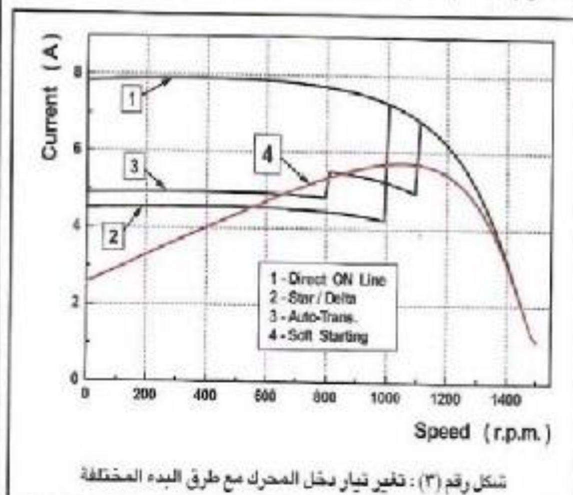
وأكثر الطرق استخداماً في بدء دوران المحركات التأثيرية ثلاثية الأطوار هى التوصيل المباشر Direct On Line للمحركات صغيرة القدرة.. ومفتاح (نجمة / دلتا) للمحركات متوسطة القدرة.. ومحول أوتو Auto - Transformer أو ملف ممانعة مغناطيسية Magnetising Reac-tance للمحركات كبيرة القدرة.

ويوضح الشكل رقم (٢) عزوم محرك ٣ حصان مع زيادة السرعة خلال فترة البدء لهذه الطرق الثلاث.. حيث يكون عزم البدء كبيرًا بالتوصيل المباشر بينما تنقص قيمته على مرحلتين باستخدام مفتاح (نجمة / دلتا).. وعلى ثلاث مراحل على الأقل باستخدام محول أوتو. ومع أى من هذه الطرق تحدث تغيرات مفاجئة للعزم تسبب الصدمات الميكانيكية .. كما تحدث صدمات كهربية نتيجة التغيرات المفاجئة في التيار المبينة في الشكل رقم (٣).

وباستخدام عملية البدء الناعم.. يتم ضبط الجهد بحيث تكون قيم تيارات المحرك عند البدء بالقدر الكافى فقط لأن تعطى المحرك عزمًا يساوى عزم الحمل عند البدء.. وهذه القيم ـ بالطبع ـ لن تؤدى إلى دوران المحرك والحمل ولكنها



شكل رقم (٢): تغير عزوم المحرك مع طرق البدء المختلفة



شكل رقم (٣): تغير تيار دخل المحرك مع طرق البدء المختلفة

السرعة التي تحدث عندها الكفاءة العظمى تزداد قليلاً عن مثيلتها للمحركات الأكبر قدرة، وتقل قليلاً للقدرات الأقل. ولأية قدرة تكون سرعة أقصى كفاءة ثابتة القيمة بتغير الجهد.

كما يلاحظ، أن أقصى كفاءة لا تحدث عند أقل تيارات المحرك لأن أقل مفاقيد تعني أقل مجموع لمفاقيد حديد المحرك Iron Losses ومفاقيد نحاس الملفات Copper Losses .. وكلما زاد التيار مع زيادة عزم الحمل زادت مفاقيد النحاس ولكن تنقص مفاقيد الحديد. ولهذا، فإن أقل مفاقيد لا تكون عند أقل تيارات. وقد وجد أن أقصى معامل قدرة Max. Power Factor يحدث أيضًا عند سرعة ثابتة لكل محرك - كانت ١٤٠٠لفة/دقيقة للمحرك ٢ حصان — وهي أقل من سرعة أقصى كفاءة للمحرك، كما في الشكل رقم (٢).

ويوضح الشكل رقم (٣) تغير تيار دخل المحرك مع تغير عزم الحمل عند جهود مختلفة. ويلاحظ أن تيار المحرك عندما يكون بدون حمل أو بحمل خفيف — يقل كلما انخفض الجهد على المحرك، وهذا ما يشير إلى تفضيل خفض الجهد عندما يكون العزم قليلاً حيث يقل التيار فتقل مفاقيد النحاس كما تقل مفاقيد الحديد، ولكن، إذا كان المحرك يحمل كبير مساو للحمل الكامل أو قريبًا منه، فإنه بخفض الجهد يزداد التيار إلى قيمة أكبر من تيار الحمل الكامل مما يسبب زيادة مفاقيد النحاس واحتراق ملفات المحرك أي أنه كلما زاد عزم الحمل على المحرك وجب أن يكون الجهد كبيرًا. وعند أي عزم، نجد أن أقصى كفاءة تحدث عند جهد معين ويكون التيار منخفضًا. وعند نفس العزم يحدث أقصى معامل قدرة عند جهد أقل من جهد أقصى كفاءة.. ويكون التيار أعلى لأن قدرة الدخل تكون أعلى.

ويوضح الشكل رقم (٤) تغير تيار العضو الدائر بتغير عزم الحمل عند جهود مختلفة .. والذي يختلف عن تيار دخل المحرك — حيث يتزايد تيار العضو الدائر بخفض الجهد سواءً كانت العزوم مرتفعة أو منخفضة — حتى ينشئ مجالاً من العضو الدائر يعوض خفض مجال العضو الثابت مع خفض الجهد. وعند عزم ثابت تحدث أقصى كفاءة عند جهد معين. ولكن أقصى معامل قدرة يحدث عند الجهد الأقل بتيار أعلى كما كان مع تيار دخل المحرك.

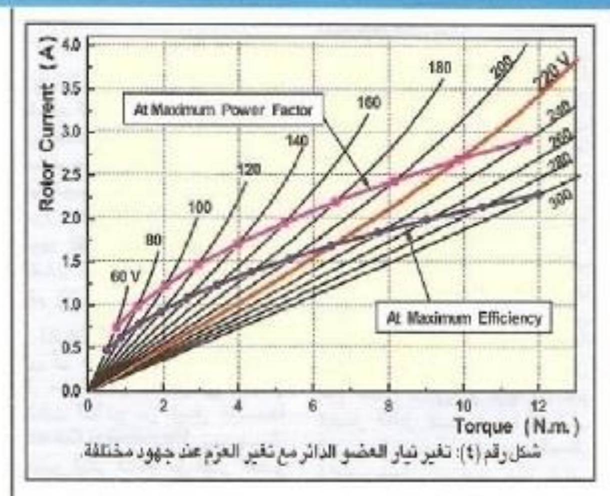
وأما مفاقيد الحديد، فإنها تقل مع زيادة العزم عند أي جهد لنقص القوة الدافعة الكهربية ومجال العضو الثابت. وتتزايد مفاقيد الحديد بزيادة الجهد كما في الشكل رقم (٥). ولكي نحصل على أقصى كفاءة عند كل عزم — لتوفير أكبر قدر ممكن من الطاقة الكهربية — يجب أن يكون الجهد منخفضًا عند العزوم الصغيرة ويتزايد مع زيادة عزم الحمل، وعندما تكون المفاقيد الحديدية بالقيم الواقعة على خط الكفاءة العظمى. أما خط معامل القدرة العظمي فيحدث لنفس العزم عند جهد أقل وتكون مفاقيد الحديد أقل. أما تغير مجموع مفاقيد نحاس العضو الثابت والعضو الدائر فيوضحه الشكل رقم (٦). حيث تتزايد هذه المفاقيد مع خفض الجهد لنفس العزم بطريقة مناظرة لما كان يحدث مع تيار العضو الثابت وتيار العضو الدائر.

وبذلك، يكون التغير في إجمالي مفاقيد المحرك المتمثلة في مجموع مفاقيد الحديد ومفاقيد النحاس كما في الشكل رقم (٧). ويجب ملاحظة زيادة المفاقيد بزيادة العزم حتى عند الكفاءة العظمى على الرغم من نقص التيارات ومفاقيد النحاس مع زيادة الجهد عند العزوم الكبيرة.

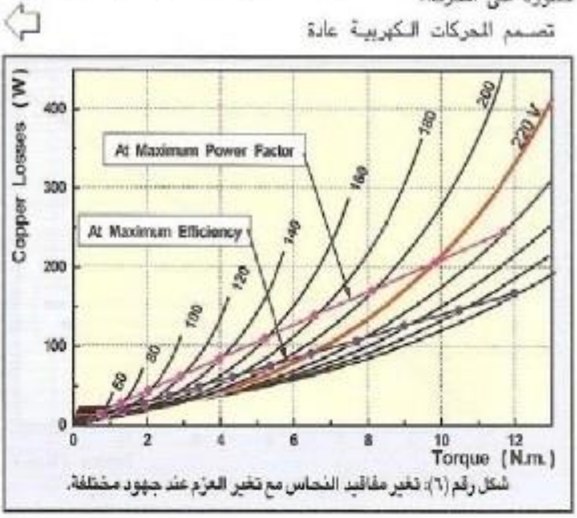
ويوضح الشكلان رقما (٨، ٩) تغير قدرة الدخل وقدرة الخرج المحرك مع تغير عزم الحمل عند الجهود المختلفة. أما الشكل رقم (١٠) فيوضح التغير الكبير في كفاءة المحرك مع تغير العزم عند الجهود المختلفة، ويتضح منه ثبات قيمة الكفاءة العظمى عند ٨٥,٦٨٪ لهذا المحرك، كما تتبين الحاجة إلى خفض الجهد عند عزم الحمل المنخفض وزيادة الجهد كلما زاد عزم الحمل حتى نحافظ على الكفاءة العالية للمحرك وبالتالي توفير الطاقة التي يستهلكها المحرك. ويلاحظ أن الجهد يجب إنقاصه في الأحمال الخفيفة أو اللاحمل حتى يصبح حوالي ٢٥٪ من الجهد المقنن للمحرك. وبتزايد عزم الحمل يجب زيادة الجهد بالشكل الموضح. ويصل الجهد إلي قيمته المقننة عند عزم حوالي (٦,٥ نيوتن متر) وهو ما يعادل ٦٥٪ من عزم الحمل الكامل الذي كانت قيمته لهذا المحرك (١٠ نيوتن متر) .. أما بعد زيادة العزم عن ٦٥٪ وحتى وصوله إلى ١٠٠٪ فإن الجهد المسلط على المحرك يجب أن يزيد عن الجهد المقنن حتى تبقى الكفاءة بالقيمة العظمى. ولكن، هل نقبل بزيادة الجهد عن قيمته المقننة؟ وكيف يحدث ذلك؟ وهل هذه الزيادة لن تتسبب في أية خطورة على المحرك؟.

تصمم المحركات الكهربية عادة بحيث تكون الكفاءة العظمى عند حمل أقل قليلاً من الحمل الكامل، وأن يتحمل المحرك جهدًا يزيد عن الجهد المقنن بمقدار ١٠٪ أو يقل عنه بمقدار ٢٠٪ طبقًا للمواصفات القياسية، وذلك لأن جهد الشبكة الكهربية في المناطق القريبة من محول التوزيع يسمح له بالزيادة بمقدار ١٠٪، وفي أبعد مناطق يمكن أن يقل بمقدار ٢٠٪. فإذا كان عزم الحمل أكبر من ٦٥٪ من الحمل الكامل وكان الجهد أعلى من المقنن، حافظنا على الكفاءة في حدود قيمتها العظمى. أما إذا كان الجهد عند القيمة المقننة فإن الكفاءة تقل، وتقل أكثر إذا كان الجهد أقل من المقنن كما يوضحه الشكل رقم (١٠). ولهذا، يجب زيادة الجهد عن المقنن بأي أسلوب حتى لو اضطررنا لاستخدام محول رفع في حالة المحركات كبيرة القدرة حيث يكون توفير الطاقة مؤثرًا.

كما يلاحظ، أن عزم الحمل إذا كان كبيرًا ومساويًا لعزم الحمل الكامل المحرك، فإنه بزيادة الجهد عن القيمة المقننة تنقص المفاقيد الكلية للمحرك ثم تعود للزيادة



شكل رقم (٤): تغير تيار العضو الدائر مع تغير العزم عند جهود مختلفة.



شكل رقم (٦): تغير مفاقيد النحاس مع تغير العزم عند جهود مختلفة.

شكل رقم (٥): تغير مفاقيد الحديد مع تغير العزم عند جهود مختلفة.

بزيادة الجهد حتى تتساوى مع مفاقيد الجهد المقنن عند جهد أعلى من المقنن بحوالي ١٥٪ ـ أي عند جهد حوالي ٢٥٥ ف ـ وأعلى من هذا الجهد عند هذا الحمل الكامل سوف تكون المفاقيد عالية عن مفاقيد الجهد المقنن وتمثل خطورة لاحتراق ملفات المحرك كما يوضحه الشكل رقم (٧).

ويرجع السبب في هذه التغيرات.. إلى أن عزم المحرك يتناسب مع كل من المجال المغناطيسي للعضو الثابت الناتج من تيار المغنطة Magnetising Current ومجال العضو الدائر الناتج من تيار العضو الدائر. فإذا زاد الجهد.. زاد تيار المغنطة ومجالها مما يؤدي لنقص تيار العضو الدائر بثبات العزم. وإنقاص تيار العضو الدائر ينقص تيار العضو الثابت وبالتالي ينقص مفاقيد النحاس. ولكن.. باستمرار زيادة الجهد عن قيمته المقننة يزداد تيار المغنطة زيادة كبيرة للتشبع الكبير في الحديد دون زيادة مجال المغنطة بنفس المعدل.. وبالتالي تزداد المفاقيد بمعدل كبير.

تساؤلات حول أجهزة توفير الطاقة

١- متى يفضل استخدام جهاز توفير الطاقة؟

عندما نجد أن الحمل على المحرك التأثيري ثلاثي الأوجه تتغير قيمته من فترة إلى أخرى.. وخصوصاً عندما تكون معظم الفترات بحمل منخفض عن الحمل الكامل للمحرك أو أن المحرك يعمل لفترات طويلة عند اللاحمل.. وهنا يجب استخدام جهاز توفير الطاقة. أما إذا كان المحرك يعمل باستمرار بالحمل الكامل فإنه لا داعي أبداً لاستخدام جهاز توفير الطاقة لأنه لن يوفرها حيث سيعطي المحرك جهداً مساوياً للجهد المقنن.

٢- هل يمكن توفير الطاقة عند استخدام أنواع أخرى من المحركات الكهربية؟

بصفة عامة .. فإن كل أنواع المحركات الكهربية يمكنها توفير الطاقة عندما يكون الحمل أقل من الحمل الكامل.. وذلك بخفض الجهد المسلط عليها.. مع الاحتياط من الآتي:

أ- إن خفض الجهد سيؤدي إلى خفض عزم البدء للمحرك.. فإذا كان عزم الحمل كبيراً عند البدء فلا يجب خفض الجهد باستعمال جهاز توفير الطاقة.. وذلك في جميع الأحمال التي يكون عزمها ثابتاً مع تغير السرعة مثل الروافع والأوناش عندما يكون عزم الحمل مساوياً أو قريباً من عزم الحمل الكامل للمحرك. أما إذا كان العزم منخفضاً عن عزم الحمل الكامل.. فيمكن استخدام جهاز توفير الطاقة بشرط أن لا يؤدي إلى خفض عزم بدء المحرك عن عزم بدء الحمل وإلا وجب إلغاء عمل جهاز توفير الطاقة عند بدء الدوران، وتشغيله بعد بدء الدوران باستخدام «كونتاكتور» ليحدث «كوبري» By Pass على الجهاز عند البدء.

ب- تبقى سرعة المحرك مع الحمل ثابتة بخفض الجهد عند استعمال الجهاز في حالة المحركات التزامنية أو التأثيرية وبالتالي لا تحدث مشاكل للحمل أو المحرك.. أما خفض الجهد في حالة المحركات التأثيرية ذات الوجه الواحد فيؤدي إلى خفض السرعة. وفي الأنواع التي تحتوي على مفتاح طرد مركزي سوف يوصل المفتاح ويؤدي إلى احتراق ملفات البدء.. أما النوع ذو المكثف الدائم فلن تحدث له أية مشكلة. ولهذا.. يمكن استخدام جهاز توفير الطاقة بأمان خصوصاً عندما يستعمل مع حمل مروحي Fan ، ولا يجب استخدام أجهزة توفير الطاقة مع الثلاجات الكهربية المنزلية بأنواعها المختلفة وكذلك أجهزة التكييف والكباسات الترددية.. ولايفضل استخدامها للمحركات العامة Universal Motors ذات عضو التوحيد والتي تعمل على التيار المتردد لأنه يخفض سرعتها وعزومها بنسبة كبيرة.. أما محركات التيار المستمر فإن خفض الجهد يؤدي إلى خفض السرعة بنسبة كبيرة.. ويمكن المحافظة على ثبات السرعة بإنقاص تيار المجال.. ولكن توفير الطاقة يكون محدوداً.. ويحتاج الجهاز إلى تحكم خاص عندما يكون عزم الحمل منخفضاً للحصول على القدر المناسب من قيمة توفير الطاقة.

شكل رقم (٧): تغير إجمالي مفاقيد المحرك مع تغير العزم عند جهود مختلفة.

ولهذا.. فإن أجهزة توفير الطاقة المتاحة حتى الآن تستخدم فقط مع المحركات التزامنية والتأثيرية ثلاثية الأوجه والتأثيرية ذات الوجه الواحد بالمكثف الدائم.. كما توجد أجهزة تستخدم مع الأحمال الكهربية التي لا تحتوي على محركات كهربية.

٣- كيف نتعرف على قيمة الحمل الموجود على المحرك الكهربي؟

للتعرف على قيمة الحمل الميكانيكي الموجود على المحرك الكهربي ـ لمعرفة مدى حاجة المحرك لجهاز توفير الطاقة من عدمه ـ ندير المحرك الكهربي عند اللاحمل ونقيس التيار الذي يأخذه المحرك في هذه الحالة وهو تيار اللاحمل Io عندما يكون الجهد المسلط على المحرك هو الجهد المقنن.. ونقيس التيار الذي يأخذه المحرك عند وجود الحمل IL .. وبمعرفة تيار الحمل الكامل للمحرك Ifl من لوحة بيانات المحرك.. يمكن حساب النسبة المئوية لقدرة الحمل الموجود على المحرك P كنسبة من قدرة الحمل الكامل للمحرك والمعروف من لوحه بياناته ـ من العلاقة:

$$P = \sqrt{(I_L - I_o) / k}$$

حيث $k = (I_{fl} - I_o)/10000$

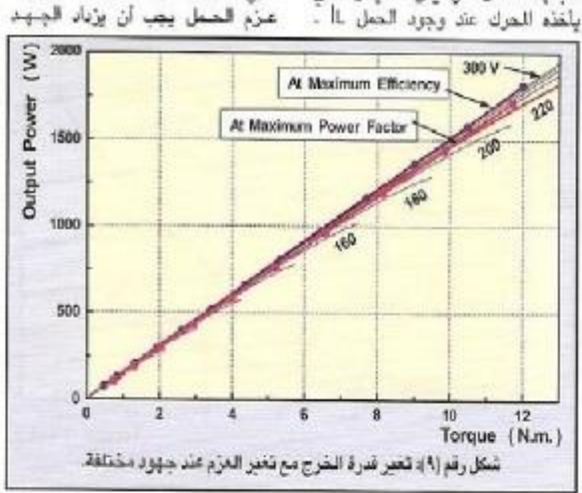
٤- ما هي المزايا الأخرى لجهاز توفير الطاقة؟

- تحسين معامل القدرة وبالتالي إنقاص التيار وتحسين خواص الشبكة الكهربية وسعر استهلاك الطاقة الكهربية.

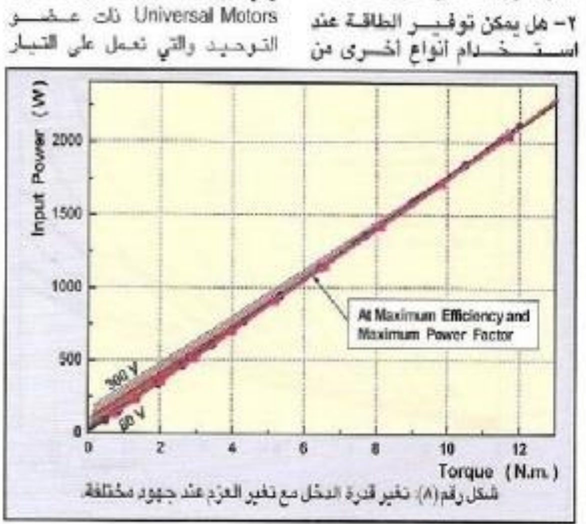
- تخفيض صوت المحرك ودرجة حرارته وبالتالي إطالة عمر المحرك مع إنقاص حاجته للصيانة.

٥- هل يمكن أن يعمل جهاز توفير الطاقة بطريقة خاطئة؟

لكي يعمل الجهاز بطريقة صحيحة يجب أن يكون الجهد المسلط على المحرك بأقل قيمة عند اللاحمل.. أي أن فرق الجهد بين طرف دخل الجهاز ونفس الطرف من خرج الجهاز أكبر ما يمكن.. وبزيادة عزم الحمل يجب أن يزداد الجهد



شكل رقم (٩): تغير قدرة الخرج مع تغير العزم عند جهود مختلفة.



شكل رقم (٨): تغير قدرة الدخل مع تغير العزم عند جهود مختلفة.

على المحرك بمعدل الزيادة الموضح في الشكل رقم(١٢). وينخفض فرق الجهد بين طرفي دخل وخرج الجهاز بزيادة عـزم الحـمـل. وللأسف أنه توجـد بعض الأجـهـزة في السـوق تعـمل بطريقة عكسـية بحيث يكون الجهد على المحرك كبيرًا عند اللاحمل ويتناقص بـزيادة الحـمـل.. وهذا التشغيل يسبب خطورة على المحرك لأنه إذا تم تحـميل المحرك بالحمل الكامل فسوف يزداد التيار كثيرًا عن تيار الحمل الكامل للمحرك مما يؤدي إلى احتراق ملفاته.. وإذا تم تحـميل المحرك بحمل أقل من الحـمل الكامل فإن الجهـاز لن يقوم بتوفير الطاقة بل سوف تزداد.. ولهذا يجب اختبار الجهاز على المحرك جيدًا وقياس قدرة دخل المحرك عند أحمال مختلفة لأنها يجب أن تقل في جميع الأحمال باستخدام الجهاز عن حالة عدم استخدامه.

٦– هل يمكن استخدام جهاز توفير الطاقة المستـخـدم للمـحـركـات التـأثـيـرية مع أنواع أخـرى من المحـركات أو مع أحـمال كـهربيـة أخرى؟

يجب أن يشـعـر الجهـاز بقـيمـة الحمل على المحـرك حتى يعطي له الجـهـد المناسب. ويتم ذلك بنظام التغذية الخلفية Feed Back للجهاز من تيار المحرك أو قدرته ثم حساب الجـهـد المناسب.. ولعـمـل هذه الحسابات تستخدم معادلات حساب خواص الأداء لـلمحركات التأثيرية حسب قدرة ومـواصفات المحرك.. وبالطبع.. فإن هذه المعادلات تختلف مع الأنواع الأخرى من المحـركات.. لهذا.. فإن الجهـاز المستخدم مع المحركات التأثيرية لا يصلح للتشغيل مع أنواع أخرى من المحركات إلا إذا كان قابلاً للتعديل والعمل مع أنواع أخرى أو أحمال كهربية أخرى.

٧– هل يمكن استخدام جهاز توفير الطاقة المستخدم مع محرك سرعته ٣٠٠٠ لفة/دقيقة لمحرك آخر سـرعـتـه ١٥٠٠ أو ١٠٠٠ لفة/دقيقة؟

نعم لأن ضبط الجهاز لن يتغير من سرعة إلى أخرى لأن معدل تغير التيار أو القدرة أو الجهد اللازم مع العزم لا يتغير تقريبًا مع اختلاف سرعة المحرك.

٨– هل يمكن استخدام جهاز توفير الطاقة للمحرك الموجود معه جهاز بدء دوران؟

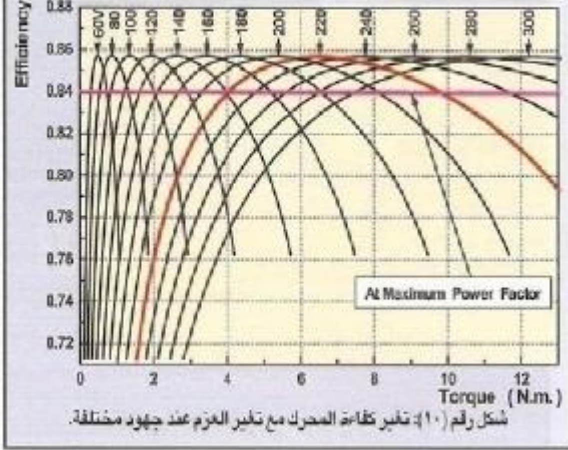
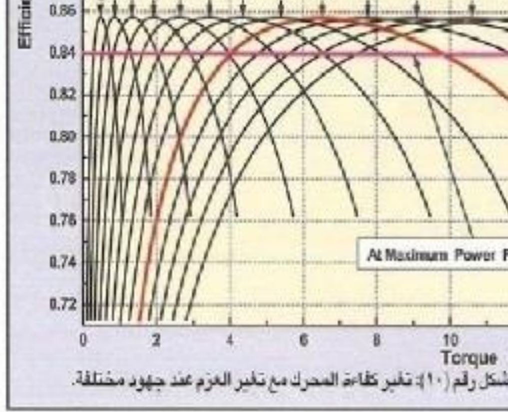
إذا كان جهاز بدء الدوران من نوع أجهزة البدء الناعم Soft Starting وبه إمكانية توفير الطاقة.. فإنه لا داعي لاستخدام جهاز توفير الطاقة. أما إذا كان جهاز البدء ليس به إمكانية توفـير الطاقـة أو كان البدء بالطرق التقليدية مثل مفتاح Star/Delta أو مانعات أو محولات.. فإنه يمكن استخدام جهاز توفير الطاقة بعد إتمام عملية بدء الدوران.

٩– هل يمكن استخدام جهاز توفير الطاقة مع محرك مستخدم معه جهاز مغير السرعة بنظام تغيير التردد؟

يصعب استخدام جهاز توفير الطاقة مع وجود مغير السرعة بطريقة تغيير التردد Inverter . لأن جهاز توفير الطاقة يصنع عادة ليعمل على تردد في حدود ٥٠ ذبذبة/ثانية.. وتغيير التردد يمكن أن يتلف الجهاز، وإذا كان تغيير السرعة يتم بالطرق البسيطة مثل المانعات فلا داعي لاستخدام جهاز توفير الطاقة.. لأن المانعات تقوم بذلك.. كما أن الجهاز سوف يخفض السرعة بمعدل أكبر.

١٠– هل يمكن استـخـدام جـهـاز توفير الطاقة لبدء دوران المحرك؟

يمكن استخدام الجهاز للحد من تيار البدء العالي للمحرك.. وبذلك يتحقق الهدف الأساسي من أي طريقة لبدء الدوران.. ولكن يجب أن يشتمل جهاز توفير الطاقة على إمكانية تحقيق ذلك باحتوائه على إمكانية العمل يدويًا أو أوتوماتيكيًا لضبط جهد الخرج.. لأن هذه الحالة سوف تتحقق بالتحكم يدويًا في جهد خرج الجهاز لإنقاصه في بداية الدوران وزيادته بالتدريج المناسب مع زيادة سرعة المحرك.

شكل رقم (١٠): تغير كفاءة المحرك مع تغير العزم عند جهود مختلفة.

١١– هل يمكن استـخـدام جـهـاز توفير الطاقة مع محرك قدرته أقل من قدرة الجهاز.. أو مع مجموعة محركات صغيرة؟

نعم يمكن ذلك إذا كان الجهاز به إمكانية تعديل التشغيل تبعًا لقدرة المحرك.. أما تشغيل الجهاز مع مجموعة محركات صغيرة مختلفة القدرة ومجموع قدراتها يساوي أو يقل عن قدرة الجهاز.. فإنه يتطلب أن تكون طبيعة أحمال المحركات متشابهة بحيث تتزايد عزوم الأحمال أو تنقص مع بعضها.. أما إذا اختلفت فلا يصح استخدام الجهاز لأنه يمكن أن يحسن أداء محرك ويتلف أداء آخر وقد يحترق المحرك.

١٢– هل يمكن استـخـدام جـهـاز تـوفـيـر الطاقـة مع المحـولات الكهربية؟

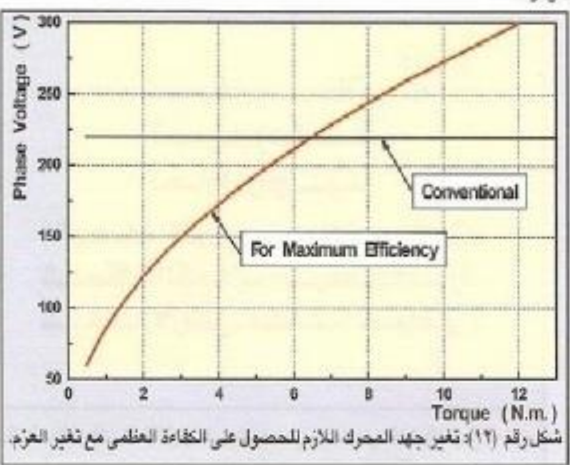
نعم.. إذا كانت أحمال المحول متشابهة وتحتاج إلى خفض الجهد عليها.. فإنه يفضل خفض الجهد على دخل المحول بدلاً من خفضه بعد خرج المحول حتى تنقص مفاقيد النحـاس والحديد في المحول وتتحسن مواصفاته وتزداد الطاقة الموفرة.

١٣– مـا هي البيانات اللازمة لاختيار جهاز توفير الطاقة؟

يتطلب اختيار الجهاز.. معرفة جهد التشغيل للمحرك وتيار الحمل الكامل وقدرة المحرك ونوعه ووجود محول خاص بالمحرك من عدمه لأنه إذا كان المحرك محول خاص به فيفضل استخدام الجهاز عند دخل المحول وبالتالي يجب ذكر جهود وتيارات دخل المحول في وجود المحرك بالحمل الكامل على خرج المحول.. كما يفضل أن يقاس ويذكر الجهد الفعلي الواصل للمحرك قبل استخدام الجهاز.. ويفضل أيضًا قياس وذكر قيم تيارات المحرك عند أحوال التشغيل المختلفة وهي البيانات الأساسية.. ثم تحدد خيارات الجهاز من حيث عمله أوتوماتيكيًا فقط أم أوتوماتيكيًا ويدويًا؟ وهل يقبل العمل مع محركات أقل قدرة أم لا؟ وهل يقبل العمل مع أنواع أخرى من المحركات أم لا؟ وهل يمكن إعادة ضبط معدلات تغير الجهد أم لا؟ وهل يشتمل الجهاز على حماية للمحرك من زيادة التيار أو زيادة الجهد أم لا؟

في العدد القادم:

محركات «السرفو»



شكل رقم (١٢): تغير جهد المحرك اللازم للحصول على الكفاءة العظمى مع تغير العزم.

Power Factor
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
60V
80
100
120
140
160
180
200
220
240
At Maximum Efficiency
0
2
4
6
8
10
12
Torque (N.m.)

شكل رقم (١١): تغير معامل القدرة مع تغير العزم عند جهود مختلفة.

مع تحياتي في الجزء الثاني محمد منير

محركات «السرفو» Servo Motors

أهم أنواع محركات التيار المستمر

د. فتحي عبد القادر
رئيس قسم الهندسة الكهربية وأستاذ الآلات الكهربية ـ هندسة شبين الكوم

ما زالت المحركات الكهربية تلقى اهتمامًا كبيرًا لتطوير تصميماتها وأشكالها بهدف تحسين خواصها لتفي بالاحتياجات المتعددة للأحمال الميكانيكية المختلفة. وأكثر هذه المحركات تطورًا في تصميماتها هي محركات «السرفو». وهذه المحركات تستخدم في أغراض التحكم الكثيرة جدًا بدءًا من أجهزة الطباعة أو الرسم بالحاسبات الإلكترونية وأجهزة الروبوت إلى أجنحة الطائرات وأجهزة الرادار.

ومحرك «السرفو».. هو المحرك الكهربي الذي يحقق الآتي:

١- الاستجابة فائقة السرعة Fast Response لتوصيل وفصل المنبع الكهربي. بمعنى.. أن المحرك يجب أن تصل سرعته إلى السرعة المقننة له فور توصيله بالمنبع الكهربي.. ولا يجب أن يأخذ المحرك فترة زمنية للوصول إلى سرعته.. كما أن المحرك يجب أن تصل سرعته إلى الصفر فور فصل المنبع عن المحرك.

٢- أن يقبل المحرك تغيير سرعته بعلاقة خطية مع جهد أو تردد المنبع. أي أن جهد المنبع إذا زاد بنسبة ١٠٪ مثلاً فيجب أن تزيد السرعة بنفس النسبة (١٠٪) وذلك في المحركات «السرفو» التي تتغير سرعتها بتغير الجهد.. أما المحركات التي تتغير سرعتها بتغيير التردد فيجب أن تكون نسبة تغير السرعة بنفس نسبة تغير التردد.

٣- أن يبقى المحرك مستقرًا في الأداء مهما تغير عزم الحمل المحدد له أو تم زيادة أو تخفيض قيمة جهد أو تردد المنبع المسلط عليه المحرك.. دون أن ينزلق أو ينفلت Slipping عن الوضع المحدد له بهذا التغير سواءً في الجهد أو التردد.

٤- أن يقبل المحرك تكرار عمليات الفصل والتوصيل مهما تعددت.

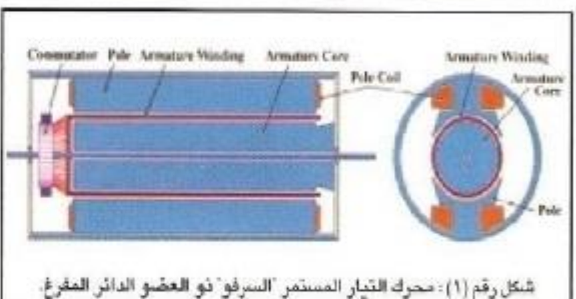
ومن أهم الشروط التي يجب أن تتحقق في محرك «السرفو» سرعة استجابة المحرك. ويتمثل العامل الرئيسي لتحقيق هذا الشرط في إنقاص عزم القصور الذاتي للمحرك إلى أقل قيمة ممكنة. وحيث أن عزم القصور الذاتي (J) يتناسب مع طول العضو الدائر للمحرك (L) ومع مربع قطر العضو الدائر (D^2) أي أن $J\alpha D^2L$ فإنه لنفس قدرة وحجم العضو الدائر يتم إنقاص عزم القصور الذاتي بإنقاص قطر العضو الدائر (D) وزيادة طوله (L) وهذا الشكل هو أهم مظهر خارجي يمكن به معرفة محرك «السرفو» من محرك القوى.

وتتنوع محركات «السرفو» بين محركات تعمل على التيار المستمر وأخرى تعمل على التيار المتردد.

ومن أهم أنواع محركات التيار المستمر «السرفو» ما يلي:

١- المحرك ذو العضو الدائر المفرغ Hollow Rotor DC Servo Motor :

يتكون هذا المحرك من عضو ثابت يشبه العضو الثابت لأي محرك تيار مستمر.. إلا أنه أقل في القطر وأكبر في الطول. أما العضو الدائر.. فقد تم تثبيت الجزء الحديدي له من جهة واحدة مع أحد أوجه المحرك لإنقاص عزم القصور الذاتي ولا يمكن الاستغناء عنه لأنه يسبب زيادة المجال المغناطيسي لكل من العضو الثابت والعضو الدائر حتى يزداد عزم المحرك. وهذا الجزء عبارة عن أسطوانة من الحديد المصمت بها ثقب يسمح بدوران محور دوران المحرك فيه.. أما موصلات العضو الدائر Armature التي يمر بها التيار وينتج منها مجال العضو الدائر ويحدث عليها قوة وعزم الدوران.. فقد تم رصها ولصقها جيدًا على اسطوانة من الألومنيوم على شكل كوب تثبت قاعدته مع محور الدوران كما يثبت عضو التوحيد Commutator مع محور الدوران جهة قاعدة الكوب كما في الشكل رقم (١).



شكل رقم (١): محرك التيار المستمر "السرفو" ذو العضو الدائر المفرغ.

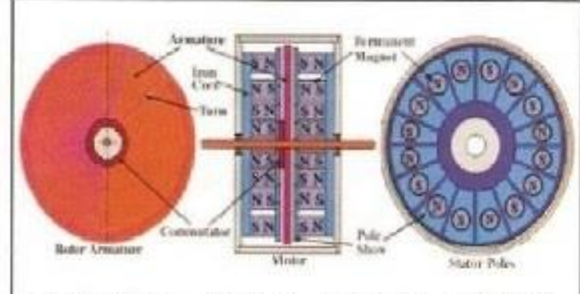
ويمكن تصنيع الكوب من أية مادة عازلة غير معدنية.. ويفضل الالومنيوم لأنه يسبب عزمًا فرمليًا مع مجال العضو الثابت يساعد على توقف المحرك فور فصل التيار عن العضو الدائر.. بالإضافة إلى أن اسطوانة الالومنيوم كتلتها صغيرة وذات متانة عالية مع سمكها الصغير. ويتم وضع الموصلات بخطوة لف تماثل آلات التيار المستمر العادية إلا أنها تكون مرصوصة بانتظام على سطح الاسطوانة من الخارج بدلاً من وضعها في مجاري -كما في حالة محركات القوى- وهكذا يصبح الجزء الدائر عبارة عن الأسلاك النحاسية والاسطوانة الألومنيوم وعضو التوحيد مع عامود الدوران. وتم الاستغناء عن دوران القلب الحديدي ليصبح العضو الدائر بأخف وزن ممكن وبالتالي أقل عزم قصور ذاتي لزيادة سرعة استجابة المحرك عند بدء الدوران والتوقف.

أما الأقطاب الموجودة في العضو الثابت فهي مثل أقطاب محركات القوى.. يمكن أن تكون مغناطيسًا دائمًا Permanent Magnet أو أقطاب حديدية على كل قطب ملف بحيث توصل الملفات مع بعضها إلى منبع تيار مستمر. وبرغم أن العضو الدائر يغذي أيضًا بمنبع تيار مستمر.. إلا أن الأقطاب لا تغذى بنفس منبع العضو الدائر.. وعادة ما تغذى منفصلة Separate Excited كما سيتضح من طرق التحكم في هذا المحرك.

وهذا المحرك يعمل بنفس نظرية عمل محركات التيار المستمر حيث ينشأ مجال مغناطيسي من العضو الدائر يتعامد في الفراغ مع المجال المغناطيسي الناتج من العضو الثابت فينشأ عزم دوران المحرك. وأهم ما يجب ملاحظته من نتيجة هذا التكوين لمحرك «السرفو».. أن عزم القصور الذاتي للعضو الدائر أصبح صغيرًا جدًا حتى يساعد في سرعة استجابة المحرك.. كما أن مقاومة أسلاك العضو الدائر تكون عالية لصغر مقطع الأسلاك مما يجعل محرك «السرفو» يتحمل تكرار بدء الدوران دون الحاجة لاستخدام أي طريقة بدء مثل إضافة مقاومة مع العضو الدائر عند البدء.

٢- المحرك ذو العضو الدائر القرصي Disk Armature DC Servo Motor:

في هذا المحرك يكون العضو الدائر عبارة عن قرص من مادة عازلة مثل «الفبر».. يثبت مع محور الدوران وترص الأسلاك على شكل لفات وتلصق على جهة واحدة من القرص أو على الجهتين وتوصل إلى

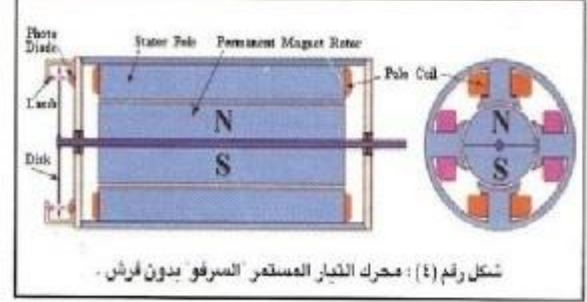


شكل رقم (٢): محرك التيار المستمر "السرفو" القرصي ذو الأقطاب البارزة.

شكل رقم (٣): محرك التيار المستمر "السرفو" القرصي ذو الأقطاب غير البارزة.

بداية الجزء الثاني : محمد منير

Mohamed Mounir



شكل رقم (٤) : محرك التيار المستمر "السرفو" بدون فرش.

عضو توحيد Commutator يثبت أيضًا على القرص. ويكون شكل كل لفة كما بالجزء الأيمن من قرص العضو الدائر Rotor Armature الموضح في الشكل رقم (٢). وعادة لا يستخدم القرص في هذا النوع من أي معدن مثل الألومنيوم لكثرة التوصيلات واللحامات مع عضو التوحيد وصعوبة عزلها عن الألومنيوم. برغم ميزة الألومنيوم في إيجاد عزم فرملي يساعد على سرعة توقف المحرك عند فصل التيار عن العضو الدائر. وأحيانًا تكون أسلاك العضو الدائر مطبوعة على سطح القرص «الفبر» من الجهتين بنفس نظام الدوائر المطبوعة Printed Circuits .. ويكون عضو التوحيد في جميع الحالات في جهة واحدة من القرص وتوصل إليه جميع اللفات في جهتي القرص.

أما العضو الثابت.. فيتكون من قرص من الحديد Iron Core ترص وتلصق على محيطه مغناطيسيات دائمة. ويثبت على كل مغناطيس حذاء قطب Pole Show لزيادة مساحة القطب وبالتالي زيادة الطول الفعال من موصلات العضو الدائر لزيادة العزم.. وبذلك يأخذ هذا الجزء من العضو الثابت الشكل الموضح في الجزء الأيمن من الشكل رقم(٢). ويوضع هذا الجزء بحيث يواجه حذاء القطب من جهة قرص العضو الدائر ويكرر جزء آخر بنفس هذا الشكل من العضو الثابت في الجهة الأخرى من قرص العضو الدائر.. أو يمكن الاكتفاء بجهة واحدة من العضو الثابت على أن تكون الجهة الثانية قرصًا حديديًا فقط لاستكمال مسار خطوط المجال المغناطيسي. وفي هذه الحالة تقل خطوط المجال المغناطيسي وينقص عزم المحرك.

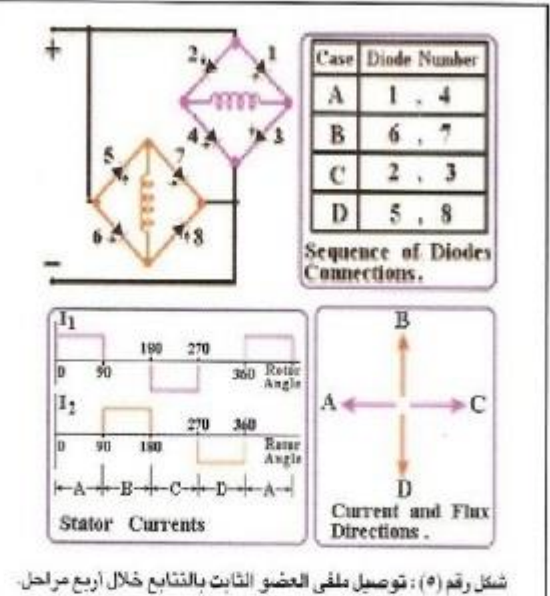
ويراعى في حالة تماثل جهتي العضو الثابت - كما بالشكل رقم (٢) - أن يكون القطب الشمالي N عند القرص في جهة بحيث يكون أمامه تمامًا من الجهة الأخرى للقرص قطب جنوبي S لتساعد الأقطاب بعضها البعض بحيث تزداد خطوط المجال المغناطيسي التي تخترق قرص العضو الدائر.

وفي الأنواع الحديثة من هذا المحرك تصنع أقطاب العضو الثابت بحيث تكون غير بارزة ويظهر العضو الثابت بشكل قرص من قطعة واحدة مستوية - شكل رقم (٣)- حيث ساعد هذا الشكل في إنقاص حجم المحرك بنسبة كبيرة وأصبح تجميعه وتصنيعه وتكلفته أبسط.

٣- محرك «السرفو» بدون فرش Brushless DC Servo Motor:

نظرًا لما للفرش الكربونية وعضو التوحيد من مشاكل كثيرة بسبب تآكل الفرش من الاحتكاك بعضو التوحيد وحدوث شرارة بين الفرش وعضو التوحيد تسبب تآكلاً أيضًا في عضو التوحيد مما يؤدي إلى حاجة هذه المحركات للصيانة المستمرة ويصبح عمرها الافتراضي قصيرًا. ففي هذا المحرك تم الاستغناء عن كل من عضو التوحيد والفرش وأصبح المحرك يتكون من عضو دائر عبارة عن أقطاب مغناطيسية دائمة Permanent Magnet Poles - تكون قطبين أو أكثر. ويوضح الشكل رقم (٤) مكونات هذا النوع من محركات «السرفو» عندما تكون أقطاب العضو الدائر قطبين فقط.

ولكي يتم دوران هذا العضو الدائر فإن العضو الثابت يجب أن يشتمل على عدد مضاعف من أقطاب العضو الدائر.. وتكون أقطاب العضو الثابت إما بارزة Salient Poles كما في الشكل رقم (٢).. أو غير بارزة بشكل اسطواني Cylindrical Poles ويوصل ملفا كل قطبين متقابلين على التوالي أو على التوازي.. وبذلك



شكل رقم (٥) : توصيل ملفى العضو الثابت بالتتابع خلال أربع مراحل.

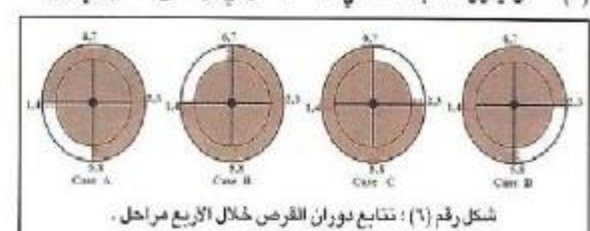
يشكل القطبان الرأسيان ملفًا واحدًا في الاتجاه الرأسي كما في الشكل رقم (٥).. ويشكل القطبان الأفقيان الملف الأفقي.

ولكي يدور العضو الدائر.. يستخدم نظام - يتبع في كثير من أنواع محركات «السرفو» أو محركات القوى التي تحتوي على أقطاب مغناطيس دائم في العضو الدائر وتعمل على منبع تيار مستمر - يقوم على إمرار التيار المستمر في ملفات أقطاب العضو الثابت بحيث ينشأ من العضو الثابت قطبان - أي بنفس عدد أقطاب العضو الدائر - ولكن أقطاب العضو الثابت يجب أن تكون على محور متعامد مع محور أقطاب العضو الدائر.. أي أن بينهما زاوية في الفراغ مقدارها ٩٠ درجة كهربية - حتى يكون عزم دوران المحرك بأكبر قيمة.

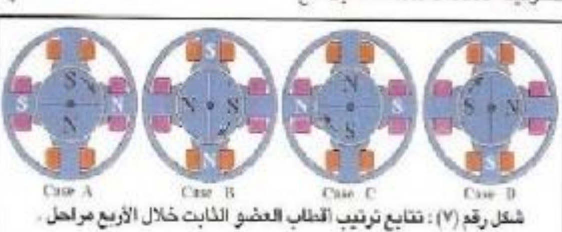
ومع دوران العضو الدائر.. يجب تبديل توصيل التيار بين الملف الرأسي والملف الأفقي وفي اتجاه يحافظ على نفس اتجاه دوران العضو الدائر.. ويتم ذلك بالتتابع اللازم أوتوماتيكيًا تبعًا لحركة دوران العضو الدائر. ولا يجب أبدًا تبديل التيار أوتوماتيكيًا مع الزمن. لأن سرعة دوران المحرك تتغير من الصفر إلى قيم مختلفة.

وتستخدم لذلك عدة موحدات ضوئية Photo Diodes تثبت مع العضو الثابت للمحرك بحيث يكون أمام كل موحد لمبة صغيرة مثبتة مع العضو الثابت تقوم بإسقاط شعاع ضوئي على الموحد حتى يصبح في وضع توصيل On .. ويكون بين اللمبة والموحد قرص رقيق يثبت على محور دوران المحرك لكي يدور القرص مع دوران العضو الدائر.. ويكون بالقرص جزء مفرغ يسمح بسقوط ضوء اللمبة على الموحد ليكون في وضع On خلال فترة وبعدها يقع الجزء غير المفرغ من القرص بين الموحد واللمبة فيمنع سقوط ضوء اللمبة على الموحد ويتحول الموحد إلى وضع الفصل Off .. وأحيانًا يستخدم ترانزستور ضوئي بدلاً من الموحد الضوئي.

ويتم توصيل الموحدات الضوئية مع الملفين ومنبع التيار المستمر كما بالشكل رقم (٥).. حيث يستخدم مع كل ملف أربعة موحدات ضوئية. ويتم ترتيب توصيل الوحدات كما بالجدول الموضح بالشكل رقم (٥) حيث يتم أولاً في الحالة A توصيل الموحد رقم 1 والموحد رقم 4 فيمر التيار في الملف الأفقي في اتجاه من اليمين إلى اليسار وبالتالي يكون مجال العضو الثابت في هذا الاتجاه A كما بالشكل رقم (٥).. ومع حركة دوران العضو الدائر يتم توصيل الموحد رقم 6 والموحد رقم 7 ليمر



شكل رقم (٦) : تتابع دوران القرص خلال الأربع مراحل.



شكل رقم (٧) : تتابع ترتيب أقطاب العضو الثابت خلال الأربع مراحل.

التيار في الملف الرأسي في اتجاه إلى أعلى في الحالة B. وفي الحالة الثالثة C يتم توصيل الموحد رقم 2 والموحد رقم 3 ليتحرك مجال العضو الثابت إلى الوضع C في اتجاه أفقي.. وفي الحالة الرابعة D يتم توصيل الموحد رقم 5 والموحد رقم 8 ليمر التيار في الملف الرأسي في الاتجاه إلى الأسفل المبين في الشكل بالوضع D . وبذلك يكون العضو الدائر قد تحرك لفة دوران واحدة.. وتتكرر الخطوات الأربعة لكل لفة دوران للعضو الدائر بحيث تتم هذه الخطوات أوتوماتيكيًا مع دوران العضو الدائر.

وبذلك.. نجد أن التيار في الملف الأفقي I_1 والتيار في الملف الرأسي I_2 يتغير مع زاوية دوران العضو الدائر بالوضع المبين في الشكل رقم (٥). حيث نجد أن تيار الملف الأفقي يمر خلال زاوية ٩٠ وبعدها يقطع هذا التيار خلال زاوية أخرى ٩٠.. ثم يوصل ولكن في اتجاه مضاد خلال زاوية ٩٠.. ثم يقطع خلال زاوية ٩٠ ثم يكرر كل ذلك. ويأخذ تغير التيار في الملف الرأسي نفس شكل تغير التيار في الملف الأفقي ولكن بزاوية ترحيل Shift مقدارها ٩٠ بحيث تكون فترات الفصل للتيار في الملف الأفقي هي فترات توصيل التيار في الملف الرأسي كما بالشكل رقم (٥).

ويتم توصيل الموحدات الثمانية بالتتابع السابق عن طريق القرص المثبت مع محور دوران العضو الدائر والذي به جزء مفرغ يسمح بسقوط الضوء الناتج من اللمبة على الموحد المقابل لها. ففي الحالة A يواجه الجزء المفرغ من القرص كلاً من الموحد 1 والموحد 4 .. وبذلك يسقط ضوء من اللمبة المقابلة للموحد 1 وضوء من اللمبة المقابلة للموحد 4 على هذين الموحدين ليتحولان إلى وضع التوصيل ON – الشكل رقم (٦). وبدوران القرص مع العضو الدائر يحل الجزء المصمت من القرص محل الجزء المفرغ في الحالة B فيحجب الضوء عن الموحدين 1 4 , وبالتالي يقطع التيار عن المرور بمسار هذين الموحدين خلال الملف الأفقي لتتحول الموحدين إلى وضع الفصل Off .. إلا أن الجزء المفرغ من القرص يكون قد تحرك ليواجه موحدين آخرين 6 , 7 حيث يحولهما إلى وضع التوصيل ON بعد أن كانا في وضع الفصل OFF ليمر التيار خلال الملف الرأسي. وهكذا يتم التحول أتوماتيكيًا أيضاً من الحالة B إلى الحالة C والحالة D ثم تتعاقب هذه الحالات مرة أخرى لكل لفة دوران للعضو الدائر.

ويتم توزيع الموحدات الثمانية ولمباتها وتثبيتها مع جسم المحرك بحيث تأخذ الأوضاع الموضحة في الشكل رقم (٦). ومع دوران العضو الدائر خلال المراحل الأربعة.. يتحرك القرص بالنسبة للموحدات كما بهذا الشكل. وبذلك يتم تغيير أقطاب العضو الثابت مع حركة دوران العضو الدائر في المراحل الأربعة كما بالشكل رقم (٧) حيث يلاحظ أن حركة تغير أقطاب العضو الثابت تتم في اتجاه دوران واحد هو نفس اتجاه دوران العضو الدائر.

ويلاحظ أنه في بداية الحالة A فإن أقطاب العضو الثابت تكون متعامدة في الفراغ مع أقطاب العضو الدائر.. أي أن الزاوية بينهما δ تكون ٩٠ فيكون عزم دوران المحرك T أكبر ما يمكن لأن العزم يتناسب مع مجال العضو الثابت ϕ_s ومجال العضو الدائر ϕ_r وجيب الزاوية بينهما δ . أي أن $T = K\phi_s\phi_r \sin(\delta)$ حيث K مقدار ثابت. وخلال الحالة A ومع دوران العضو الدائر تقل الزاوية δ. فيتناقص العزم حتى نهاية الحالة A ثم يزيد مع بداية الحالة B ثم يتناقص وهكذا. ولزيادة العزم تستخدم طرق أخرى لتتابع توصيل الموحدات. ويوضح الشكل رقم (٨) طريقة أفضل لتتابع توصيل الموحدات حيث يتم التبديل كل ٤٥ بدلاً من ٩٠ خلال ثمانية حالات من A إلى H بدلاً من الأربعة حالات من A إلى D.

Case	Diode Number	Case	Diode Number
A	1 , 4	E	2 , 3
B	1 , 4 , 6 , 7	F	2 , 3 , 5 , 8
C	6 , 7	G	5 , 8
D	6 , 7 , 2 , 3	H	5 , 8 , 1 , 4

Sequence of Diodes Connections .

I_1 0 90 180 270 360 Rotor Angle

I_2 0 90 180 270 360 Rotor Angle

A – B – C – D – E – F – G – H

Stator Currents

C B D A E H F G

Flux Direction at Different Cases .

شكل رقم (٨) : تتابع توصيل ملفى العضو الثابت خلال ثمان مراحل .

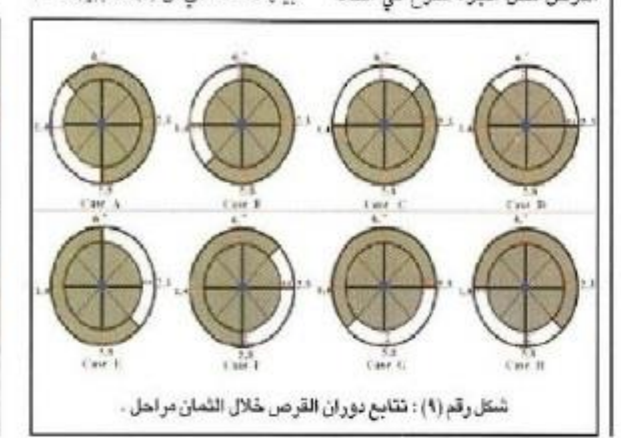
وفي هذه الطريقة.. يتم توصيل الموحدين 1 , 4 في الحالة A فيمر التيار في الملف الأفقي من اليمين إلى اليسار حيث يأخذ المجال المغناطيسي الاتجاه الأفقي المبين بالوضع A في الشكل رقم (٨).. وبعد ٤٥ لدوران العضو الدائر نصل إلى الحالة B حيث يبقى الموحدان 1 , 4 في وضع توصيل ويضاف إليهما الموحدان 6 , 7 حيث يصبحان في وضع توصيل.. وبذلك يمر التيار في هذه الحالة في كل من الملفين الأفقي والرأسي معًا فيأخذ المجال المغناطيسي اتجاه الوضع B الذي تحرك بزاوية ٤٥ عن الوضع A كما بالشكل رقم (٨).. ثم نصل إلى الحالة C حيث يمر التيار في الملف الرأسي وينفصل عن الملف الأفقي لأنه يتم في هذه الحالة C توصيل الموحدين 6 و 7 فقط. وهكذا.. تتغير أوضاع التوصيل والفصل في بقية الحالات حتى الحالة H في لفة دوران واحدة للعضو الدائر ثم تتكرر نفس الحالات في اللفة الثانية وما بعدها وهكذا.

وفي هذه الطريقة يبقى التيار I_1 مارًا بالملف الأفقي والتيار I_2 مارًا بالملف الرأسي طوال زاوية دوران للعضو الدائر مقدارها ١٣٥ كما بالشكل رقم (٨) بدلاً من ٩٠ في الطريقة السابقة.. حيث يكون الجزء المفرغ من القرص الدوار مستمرًا لزاوية ١٣٥. ويدور القرص من حالة إلى أخرى بزاوية ٤٥ كما بالشكل رقم (٩). وبذلك ينشأ في الحالة A قطبان في الاتجاه الأفقي.. أما في الحالة B فينشأ قطبان في الاتجاه الرأسي مع قطبين في الاتجاه الأفقي كما في الشكل رقم (١٠).. حيث يلاحظ ترتيب الأقطاب بحيث تكون قطب شمالي N يليه قطب شمالي ثان يليه قطب جنوبي S ثم قطب جنوبي ثان حتى تكون محصلة الأقطاب عبارة عن قطبين فقط شمالي وجنوبي كلاهما باتساع كبير.

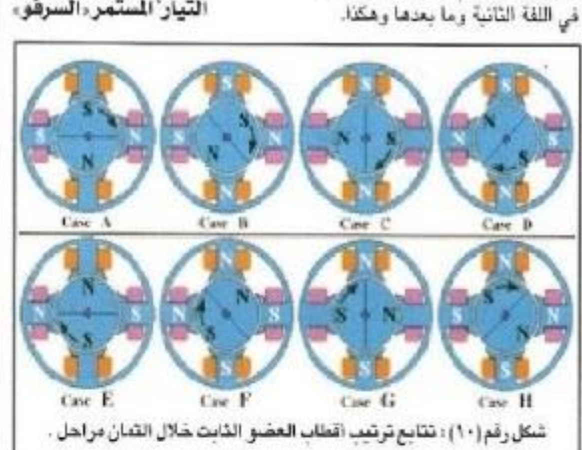
ولا يجوز أن يكون ترتيب الأقطاب شمالي ثم جنوبي ثم شمالي ثم جنوبي لأنها في هذه الحالة سوف تمثل أربعة أقطاب من العضو الثابت.. ومع قطبين من العضو الدائر فإن عزم الدوران سيكون صفر ولن يدور العضو الدائر.

والترتيب الصحيح لتتابع أقطاب العضو الثابت في الحالات الثمانية من A إلى H يجب أن يكون في اتجاه مع دوران العضو الدائر كما يوضحه الشكل رقم (١٠).

في العدد القادم:
التحكم في محركات التيار المستمر «السرفو»



شكل رقم (٩) : تتابع دوران القرص خلال الثمان مراحل .



شكل رقم (١٠) : تتابع ترتيب أقطاب العضو الثابت خلال الثمان مراحل .

محركات «السرفو» Servo Motors

(٢) التحكم في محركات التيار المستمر «السرفو»

د. فتحي عبد القادر
رئيس قسم الهندسة الكهربية وأستاذ الآلات الكهربية ـ هندسة شبين الكوم

تختلف محركات «السرفو» التي تعمل على مصدر التيار المستمر DC Servo Motors اختلافات كثيرة عن محركات التيار المستمر التقليدية DC Power Motors. وأهم ما يميز محركات «السرفو» أنها تتحمل تكرار عمليات التشغيل والبدء Multy Starting بأي عدد من المرات. وحيث أن محركات التيار المستمر التقليدية يجب أن يستخدم معها وسيلة بدء حركة ـ لأن تيار عضو الاستنتاج Armature عند البدء يزيد على عشرين ضعف تيار الحمل الكامل. وتتمثل وسيلة البدء في إضافة مقاومة متغيرة بالتوالي مع عضو الاستنتاج أو إنقاص جهد عضو الاستنتاج عند البدء.

ونظرًا للتكرار الزائد في بدء دوران محركات «السرفو».. إلى جانب ضرورة سرعة الاستجابة Fast Response.. فإنه لا يمكن إضافة مقاومة مع عضو الاستنتاج عند البدء ثم إنقاصها مع زيادة السرعة لأن ذلك يؤدي إلى تباطؤ التشغيل والإخلال بسرعة الاستجابة. ولهذا.. فإن موصلات عضو الاستنتاج في محركات «السرفو» تكون ذات مساحة مقطع صغير مما يؤدي إلى زيادة مقاومة عضو الاستنتاج ذاته بحيث لا يحتاج لإضافة مقاومة بدء دوران.. كما أن نقص مقطع الموصلات هذا يؤدي إلى خفض وزن عضو الاستنتاج وبالتالي خفض عزم القصور الذاتي للعضو الدائر مما يساعد على زيادة سرعة استجابة المحرك.

وبهذا.. نجد أن مقاومة عضو الاستنتاج في محركات «السرفو» تكون أكبر بكثير من نظيرتها في محركات التيار المستمر التقليدية حيث تصل إلى حوالي ١٠ أضعاف.. وهذا الفرق جوهري وأساسي لتفسير خواص الأداء المختلفة لمحركات «السرفو» مع منظومات التحكم ويسبب اختلافات كثيرة مع خواص الأداء لمحركات التيار المستمر التقليدية.

وتنحصر منظومات التحكم في محركات «السرفو» في الطريقتين التاليتين:

١- التحكم في جهد عضو الاستنتاج Armature Control

يقصد بالتحكم هنا.. التحكم في سرعة دوران محرك «السرفو» والذي يتم بتغيير الجهد المسلط على عضو الاستنتاج ـ مع تثبيت الجهد المسلط على ملفات المجال Winding–Field والذي يتم بتوصيل ملفات المجال إلى مصدر تيار مستمر ثابت الجهد بالقيمة المقننة لملفات المجال. أما عضو الاستنتاج فيوصل إلى منبع جهد تيار مستمر بحيث يمكن التحكم في قيمة هذا الجهد وذلك باستخدام دوائر تقطيع إلكترونية Chopper Circuits. أما إذا كان المنبع المتاح ذا تيار متردد وجه واحد أو ثلاثة أوجه.. فتستخدم قنطرة توحيد Bridge Rectifier ثابتة الجهد مع ملفات المجال وقنطرة توحيد «ثايرستور» Thyristor Bridge Rectifier مع عضو الاستنتاج كما بالشكل رقم (١) وذلك لتغيير الجهد المسلط على عضو الاستنتاج بتغيير زاوية إشعال «الثايرستور» Firing Angle.

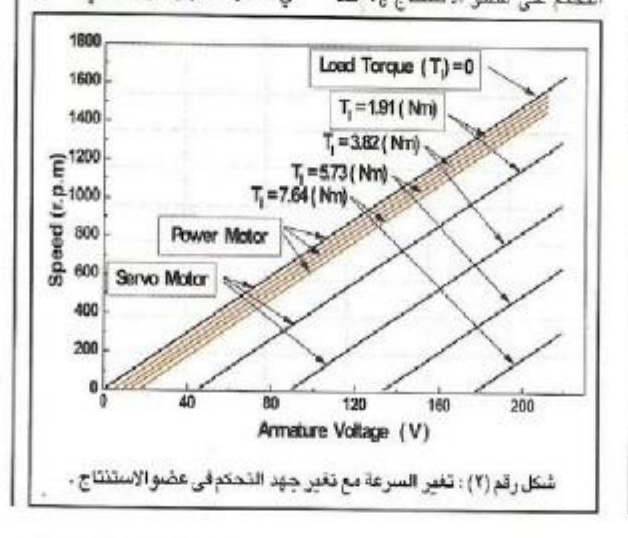
ولتشغيل محرك «السرفو» بهذا النظام.. يتم أولاً ضبط السرعة المراد تشغيل المحرك بها وذلك بضبط مقاومة متغيرة Potentiometer لضبط زاوية إشعال «الثايرستور» أو ضبط أي نظام يضبط زاوية الإشعال.. وهذا الضبط لا يؤدي إلى تشغيل «الثايرستور».. بل يتم الضغط على المفتاح (ON) ليتم تغذية بوابة Gate «الثايرستور» حتى يعمل المحرك ويدور بحيث يصل إلى سرعته في وقت صغير جدًا.. ويبقى المحرك دائرًا طوال فترة الضغط على المفتاح (ON).. وعند عدم الضغط على هذا المفتاح يقف المحرك فورًا. ويمكن تكرار الضغط على المفتاح حتى وصول الحمل إلى الوضع المطلوب. ولعكس اتجاه الدوران يتم تبديل طرفي عضو الاستنتاج.

ولكن.. كيف تتغير سرعة محرك «السرفو» بهذه الطريقة؟ وكيف يتأثر أداء المحرك بتغيير عزم الحمل؟ وما الفرق بينه وبين محرك القوى مع هذا الأداء؟

حيث أن سرعة الدوران N لأي محرك تيار مستمر تتناسب طرديًا مع القوة الدافعة الكهربية E لعضو الاستنتاج وعكسيًا مع مجال الأقطاب ϕ.. أي أن ($N \propto E/\phi$) .. وحيث أن $E = V_c - I_a r_a$ عندما يكون جهد التحكم المسلط على عضو الاستنتاج V_c وتيار عضو الاستنتاج Ia ومقاومة عضو الاستنتاج r_a .. ومع ثبات مجال الأقطاب ϕ عند قيمته المقننة في هذه الطريقة فإن سرعة الدوران N تصبح $N \propto (V_c - I_a r_a)$. ومن هذه العلاقة نجد أن سرعة دوران المحرك N تتغير بتغير جهد التحكم على عضو الاستنتاج V_c كما بالشكل رقم (٢) عند قيم مختلفة لعزم الحمل T_L لكل من محرك «السرفو» ومحرك القوى.

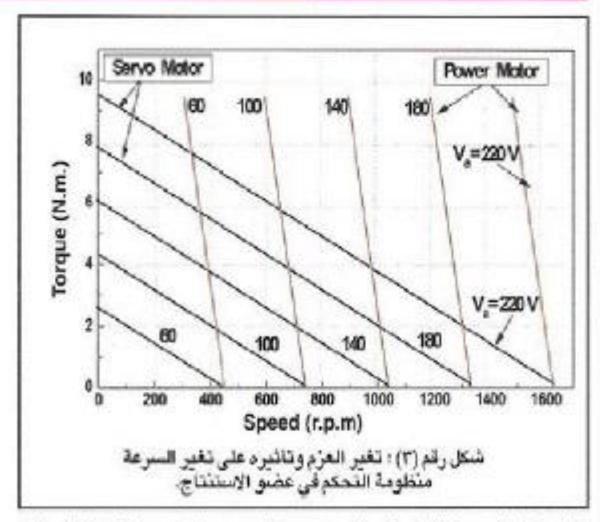
وفي هذا الشكل.. نجد أن سرعة الدوران تزيد خطيا مع زيادة جهد التحكم على عضو الاستنتاج. وهذه الخاصية الخطية هامة ولازمة لمحركات «السرفو» لتبسيط مكونات جهاز التحكم في السرعة. ونلاحظ.. أن المحرك إذا كان بدون حمل فإن أي جهد ولو صغير يؤدي إلى دوران المحرك.. أما إذا كان المحرك سيبدأ دورانه وهو محمل فإنه يحتاج إلى جهد لكي يبدأ في الدوران.. ويزداد هذا الجهد اللازم للدوران كلما زاد الحمل على المحرك. وعند اللاحمل يكون تيار عضو الاستنتاج I_a قريبًا من الصفر.. وبذلك يكون الجزء $I_a r_a$ في معادلة السرعة قريبًا من الصفر.. أي أن السرعة N تتناسب مباشرة مع الجهد V_c.. أي أن ($N \propto V_c$). ويكون خط تغير السرعة واحد لكل من محرك «السرفو» ومحرك القوى كما في الشكل رقم (٢).

ومع زيادة عزم الحمل على المحرك وحيث أن العزم يتناسب مع تيار عضو الاستنتاج أي أن ($T_L \propto I_a$) .. فإنه لنفس عزم الحمل وعند سرعة دوران ثابتة فإن جهد التحكم اللازم لهذه السرعة يكون كبيرًا في محرك «السرفو» عنه في محرك القوى وذلك لزيادة الجزء $I_a r_a$ في محرك «السرفو» عن محرك القوى بسبب زيادة r_a في محرك «السرفو» عنها في محرك القوى ـ وكما في الشكل

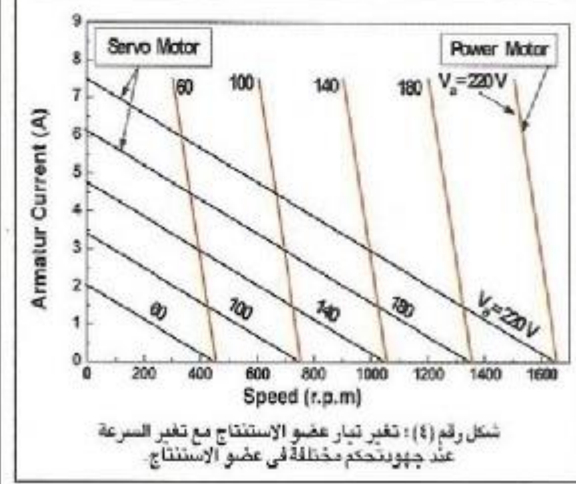


شكل رقم (٢): تغير السرعة مع تغير جهد التحكم في عضو الاستنتاج.

شكل رقم (١): منظومة التحكم في جهد عضو الاستنتاج.



شكل رقم (٣) : تغير العزم وتاثيره على تغير السرعة منظومة التحكم في عضو الاستنتاج.



شكل رقم (٤) : تغير تيار عضو الاستنتاج مع تغير السرعة عند جهودتحكم مختلفة في عضو الاستنتاج.

تظهر هنا خاصية هامة وفاصلة بين محرك «السرفو» ومحرك القوى.. ففي محرك القوى تتناقص السرعة بدرجة بسيطة مع زيادة عزم الحمل على المحرك عند ثبات جهد عضو الاستنتاج V_a وهو جهد التحكم كما في الشكل رقم (٣).. بينما تتناقص السرعة بدرجة كبيرة في محرك «السرفو» مع زيادة عزم الحمل كما بالشكل وذلك بسبب زيادة مقاومة عضو الاستنتاج r_a اللازمة للاستغناء عن وسيلة بدء الحركة في محرك «السرفو». ومع إنقاص الجهد تنقص السرعة كما بالشكل مع بقاء جميع الحالات خطية عند جميع العزوم والسرعات والجهود.. وبذلك تتضح أهمية المحافظة على خاصية العلاقات الخطية اللازمة لمحركات «السرفو» كما أن ميل المنحنى يبقى ثابتاً عند أي جهد وأي عزم مما يجعل ثابت العلاقات الخطية بنفس القيمة لأي عزم وأي جهد مما يؤدي إلى تبسيط مكونات جهاز التحكم في جهد عضو الاستنتاج.

وحيث أن تيار عضو الاستنتاج يتناسب مع العزم بعلاقة خطية.. فإن تغير هذا التيار مع تغير السرعة والعزم لكل من محرك «السرفو» ومحرك القوى يأخذ شكلاً مشابهًا لتغير العزم كما في الشكل رقم (٤).. وفيه نجد أن محرك القوى عند أي جهد وبزيادة العزم حتى عزم الحمل الكامل (٩,٥ نيوتن متر) يزداد التيار حتى تيار الحمل الكامل (٧,٥ أمبير) .. كما أنه يمكن تحميل المحرك بعزم الحمل الكامل حتى عند الجهود المنخفضة.. أما محرك «السرفو» فإنه لا يمكن تحميله بنفس عزم الحمل الكامل إذا قل جهد عضو الاستنتاج عن الجهد المقنن وبالتالي يتناقص التيار عن تيار الحمل الكامل.

وتتغير قدرة خرج المحرك مع تغير السرعة عند الجهود المختلفة كما بالشكل رقم (٥).. حيث تكون قدرات خرج محرك «السرفو» أقل منها في محرك القوى.. أما قدرة دخل المحرك بالشكل رقم (٦) فتكون عالية عند الجهد المقنن وتتساوى عند نفس العزم لكل من محرك «السرفو» ومحرك القوى لتساوي التيار.. إلا أن قدرة خرج محرك «السرفو» تقل عند نفس العزم بنفس التيار لزيادة القدرة المفقودة في مقاومة عضو الاستنتاج الكبيرة في حالة محرك «السرفو» وحيث تكون السرعة أقل في هذا المحرك. وبخفض جهد التحكم تنخفض قدرة الدخل كما بالشكل.

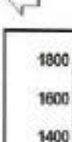
وتؤدي محصلة قدرة الخرج وقدرة الدخل إلى كفاءة المحرك Motor Efficiency المبينة في الشكل رقم (٧) – حيث تنخفض كفاءة محرك «السرفو» عن كفاءة محرك القوى بسبب القدرة العالية المستهلكة في مقاومة عضو الاستنتاج الكبيرة في محرك «السرفو».. ويتم التضحية بالكفاءة المنخفضة في محرك «السرفو» في سبيل الحصول على خواص «السرفو».. إلا أنه باختيار عزم حمل مناسب يمكن أن يعمل محرك «السرفو» عند الكفاءة العظمى لكل سرعة بالجهد المناسب لها.

٢- التحكم في جهد المجال Field Control:

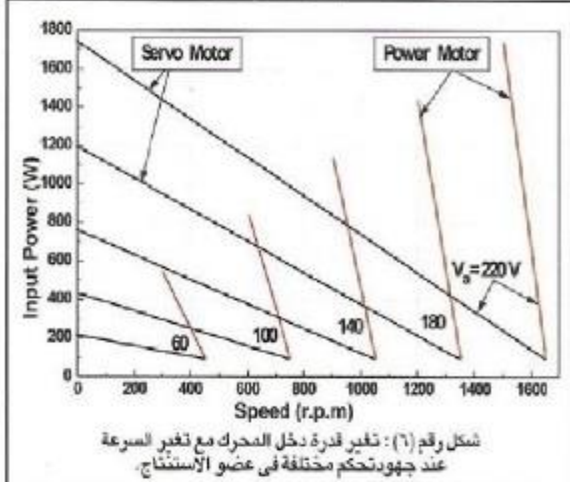
في هذه الطريقة.. يتم التحكم في سرعة محرك «السرفو» بالتحكم في قيمة جهد تغذية ملفات الأقطاب مع بقاء الجهد المسلط على عضو الاستنتاج ثابتًا عند القيمة المقننة. ويلاحظ.. أن هذا الجهد المقنن برغم ثباته عندما يكون المحرك ساكنًا فإنه لا يسبب مرور تيار عال يمثل خطورة على محرك «السرفو» كما يحدث لمحرك القوى حيث يمر تيار يزيد على عشرين ضعف تيار الحمل الكامل.. بل يمر في محرك «السرفو» تيار يساوي تيار الحمل الكامل فقط.. لأن مقاومة عضو الاستنتاج عالية في محرك «السرفو».

وفي هذه الطريقة التحكم.. يتم توصيل طرفي عضو الاستنتاج إلى القنطرة ثابتة الجهد كما في الشكل رقم (٨).. عندما يكون المصدر تيارًا مترددًا ثلاثي الأوجه.. وتوصيل ملفات المجال في محرك «السرفو» إلى القنطرة التي تحتوي على وحدات «الثايرستور» حيث يمكن التحكم في قيمة جهد الخرج إلى ملفات المجال.

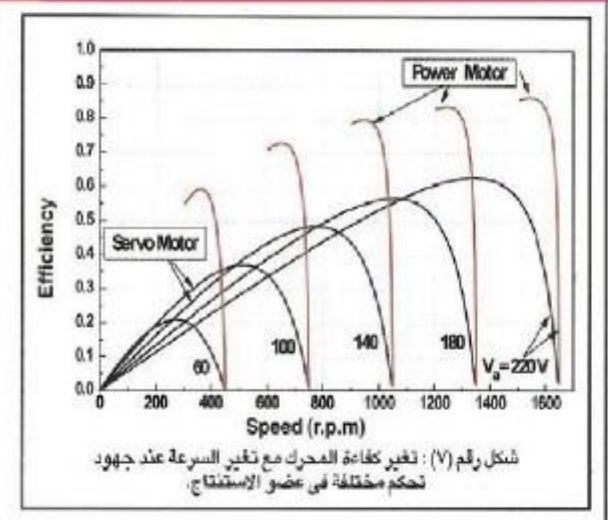
وحيث أن سرعة المحرك تتناسب



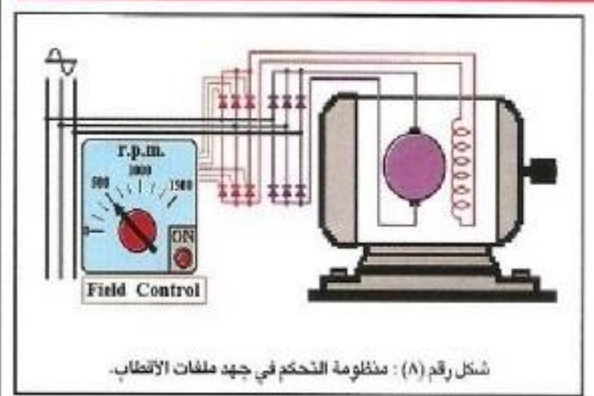
شكل رقم (٥) : تغير قدرة خرج المحرك مع تغير السرعة عند جهود تحكم مختلفة في عضو الاستنتاج.



شكل رقم (٦) : تغير قدرة دخل المحرك مع تغير السرعة عند جهودتحكم مختلفة في عضو الاستنتاج.



شكل رقم (٧) : تغير كفاءة المحرك مع تغير السرعة عند جهود تحكم مختلفة في عضو الاستنتاج.



شكل رقم (٨) : منظومة التحكم في جهد ملفات الأقطاب.



عكسيًا مع مجال الأقطاب ϕ الذي يتناسب طرديًا مع تيار ملفات المجال أو جهد ملفات المجال V_f .. فإن سرعة المحرك في هذه الطريقة للتحكم تكون $N \propto (V_a - I_a r_a) / V_f$ .. وبالتالي تتغير سرعة المحرك عكسيًا مع تغير جهد المجال كما بالشكل رقم (٩) حيث تتناقص السرعة بزيادة جهد التحكم في المجال V_f عندما يكون المحرك بدون حمل أو مع أحمال خفيفة حيث يكون الجزء $I_a r_a$ في معادلة السرعة صغيرًا.. أما مع عزوم الحمل الكبيرة فإن خفض الجهد V_f بهدف زيادة السرعة يتبعه خفض تيار المجال I_f. وعند العزم الثابت للحمل T_L فإن ($T_L \propto I_a I_f$).. وبالتالي يزداد تيار عضو الاستنتاج I_a زيادة كبيرة عند العزوم الكبيرة مما يزيد الجزء $I_a r_a$ في معادلة السرعة حيث تنقص السرعة بسبب زيادة I_a بنسبة أكبر من زيادتها بسبب خفض I_f.. وتكون النتيجة - مع العزوم الكبيرة - نقص السرعة مع خفض V_f بدلاً من زيادتها بمثل ما كان يحدث مع العزوم الصغيرة للحمل. أي أن تغيير جهد التحكم في المجال V_f مع العزوم الكبيرة يفشل في تغيير السرعة في محركات «السرفو» بجانب مشكلة عدم توفر العلاقة الخطية لتغير السرعة مع تغير جهد التحكم في مجال الأقطاب.. ولكن تبقى ميزة إمكانية الحصول على سرعات عالية وتحكم مناسب في السرعة عند عزوم الحمل الصغيرة. وهذه السرعات العالية يصعب الحصول عليها بنظام التحكم في جهد عضو الاستنتاج.

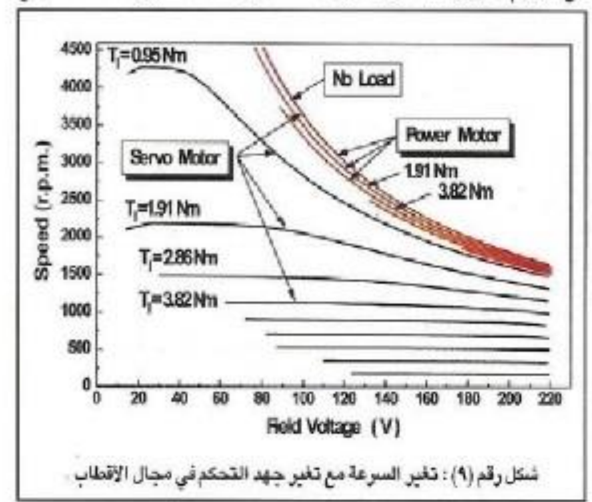
أما في محركات القوى.. ونظرًا لصغر r_a وبالتالي صغر الجزء $I_a r_a$ في معادلة السرعة- أي أن نقص السرعة نتيجة هذا الجزء يكون أقل بكثير من زيادة السرعة نتيجة لخفض V_f وبالتالي خفض I_f - فإن زيادة السرعة تتحقق بسهولة بخفض جهد التحكم في المجال في محركات القوى سواءً كانت العزوم صغيرة أو كبيرة للحمل كما في الشكل رقم (٩).

وبهذا الأسلوب للتحكم في السرعة.. فإن سرعة المحرك تتغير بتغير عزم الحمل عند جهود تحكم في المجال V_f ثابتة كما في الشكل رقم (١٠).. حيث يتميز هذا الأسلوب بإمكانية الحصول على سرعات عالية تزيد على ضعف ما كان يتم الوصول إليه بمنظومة التحكم في جهد عضو الاستنتاج. ويلاحظ.. أنه برغم تغير السرعة مع تغير العزم لأي جهد V_f بشكل خطي فإن معدل هذا التغير- الذي يعبر عنه بميل خطوط الخواص هذه - يختلف من جهد إلى آخر مما يحتم تغيير ثوابت علاقات جهاز التحكم في هذه المنظومة.

ويوجد معامل مهم في منظومات التحكم يسمى بمعامل الاضمحلال المصاحب Inherent Damping Factor(K_d). وهذا العامل يعبر عن معدل تغير العزم بالنسبة للسرعة.. أي أن K_d=dT/dN. وكلما زاد هذا العامل كانت منظومة التحكم أفضل لأن ذلك يعني أن السرعة تتغير قليلاً بتغير عزم الحمل.. أي أن المحرك يحدث اضمحلالاً ويقاوم أي إخلال بالسرعة المضبوط عليها لو حدث تغير لعزم الحمل. ويوضح الشكل رقم (١٠) أن هذا العامل K_d يكون بأعلى قيمة عند أكبر جهد تحكم للمجال V_f ويتساوى مع منظومة التحكم بتغيير جهد عضو الاستنتاج. أما مع منظومة التحكم بتغيير جهد المجال.. فإن هذا العامل يتناقص بتناقص جهد المجال كما يوضحه تزايد ميول المنحنيات في الشكل رقم (١٠).. بينما كان K_d ثابتًا عند القيمة الكبيرة بتناقص جهد عضو الاستنتاج في الشكل رقم (٣).

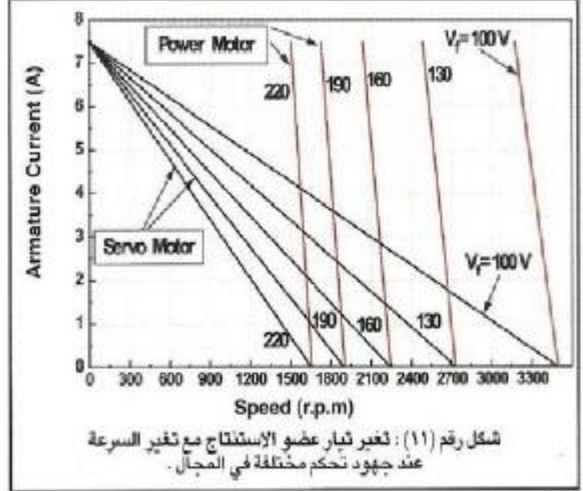
أما تيار عضو الاستنتاج.. فإنه يتغير بتغير السرعة عند جهود تحكم المجال V_f المختلفة كما بالشكل رقم (١١) حيث ينخفض التيار مع زيادة السرعة والتيارات العالية لعضو الاستنتاج عند أي سرعة تكون مع جهد تحكم المجال الأقل لنقص تيار المجال وتعويضه بزيادة تيار عضو الاستنتاج. وعلى الرغم من أن معدل تغير تيار عضو الاستنتاج مع تغير السرعة ثابت لكل جهد تحكم في المجال فإن هذا المعدل يتغير من جهد إلى آخر.. بينما كان هذا المعدل ثابتًا لأي جهد تحكم في منظومة التحكم عن طريق جهد عضو الاستنتاج كما بالشكل رقم (٤).

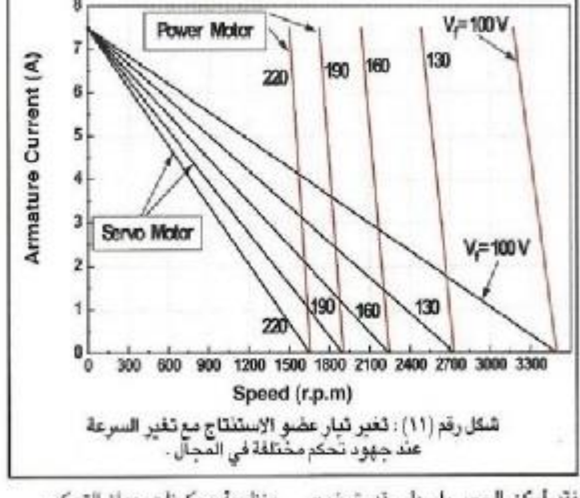
وفي منظومة التحكم بتغيير جهد المجال.. تتغير قدرة خرج المحرك بتغير السرعة كما في الشكل رقم (١٢). ونظرًا لزيادة مدى السرعة..



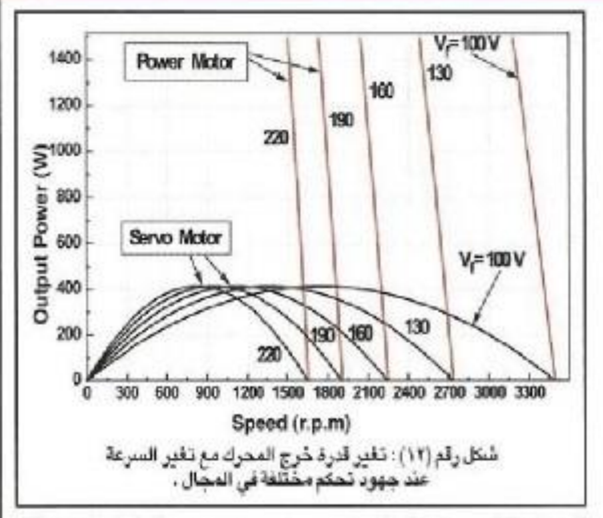
شكل رقم (٩) : تغير السرعة مع تغير جهد التحكم في مجال الأقطاب.

شكل رقم (١٠) : تغيير العزم وتأثيره على السرعة بمنظومة التحكم في المجال.





شكل رقم (١١) : تغير تيار عضو الاستنتاج مع تغير السرعة عند جهود تحكم مختلفة في المجال.



شكل رقم (١٢) : تغير قدرة خرج المحرك مع تغير السرعة عند جهود تحكم مختلفة في المجال.

فقد أمكن الحصول على قدرة خرج عظمى في حدود ٤٠٠ وات من هذا المحرك خلال فترة تغير في السرعة من ٦٥٠ – ٢١٠٠ لفة/دقيقة.. بدلاً من نفس القدرة لكن خلال مدى أقل لتغير السرعة من ٧٠٠ – ١٠٠٠ لفة/دقيقة بمنظومة التحكم في جهد عضو الاستنتاج - شكل رقم (٥).

وتتغير قدرة دخل محرك «السرفو» مع تغير السرعة عند جهود تحكم مختلفة لدائرة المجال كما بالشكل رقم (١٣).. حيث تكون منخفضة في السرعات العالية.. ولهذا تتحسن كفاءة المحرك في السرعات العالية بمنظومة التحكم في جهد المجال كما في الشكل رقم (١٤) حيث تصل الكفاءة إلى ٨٠٪ لهذا المحرك.. بينما كانت أقصى كفاءة ٦٣٪ بمنظومة التحكم في جهد عضو الاستنتاج كما بالشكل رقم (٧).

مزايا منظومة التحكم في جهد عضو الاستنتاج:

١- تتغير السرعة والعزم وتيار عضو الاستنتاج تغيرًا خطيًا مع تغير جهد التحكم- مما يؤدي إلى تبسيط منظومة ومكونات جهاز التحكم.

٢- يبقى معدل التغير لأي من السرعة والعزم وتيار عضو الاستنتاج بالنسبة لجهد التحكم (dN/dV_a) ، (dT/dV_a) ، (dI_a/dV_a) ثابتًا مع أي قيمة لجهد التحكم مما يزيد من تبسيط منظومة ومكونات جهاز التحكم.

٣- قيمة عالية وثابتة لمعامل الاضمحلال Inherent Damping (dT/dN) مما يؤدي إلى سرعة استجابة المحرك للفصل والتوصيل وعكس اتجاه الدوران والتغيرات الطارئة في عزم الحمل.

٤- ممانعة عضو الاستنتاج أقل كثيرًا من ممانعة ملفات الأقطاب مما يجعل ثابت الزمن Time Constant لعضو الاستنتاج صغيرًا فيقل زمن التيارات الانتقالية Transient Currents عند التحكم عن طريق عضو الاستنتاج مما يزيد من سرعة استجابة محرك «السرفو».

٥- يمر تيار عضو الاستنتاج عن طريق الفرش Brushes وعضو التوحيد Commutator عند دوران المحرك فقط دون فترات التوقف.. كما يكون التيار صغيرًا مع الأحمال الخفيفة مما يحافظ على الفرش وعضو التوحيد ويزيد من عمر المحرك وتقل حاجته للصيانة.

مزايا منظومة التحكم في جهد المجال:

١- إمكانية الحصول على سرعات عالية من المحرك.

٢- مدى كبير لتغير السرعة يزيد على ضعف المدى مع منظومة التحكم في جهد عضو الاستنتاج.

٣- استمرارية قدرة الخرج العالية التي يمكن الحصول عليها من المحرك خلال مدى كبير لتغير السرعة.

٤- كفاءة أعلى للمحرك عن حالة التحكم في جهد عضو الاستنتاج.

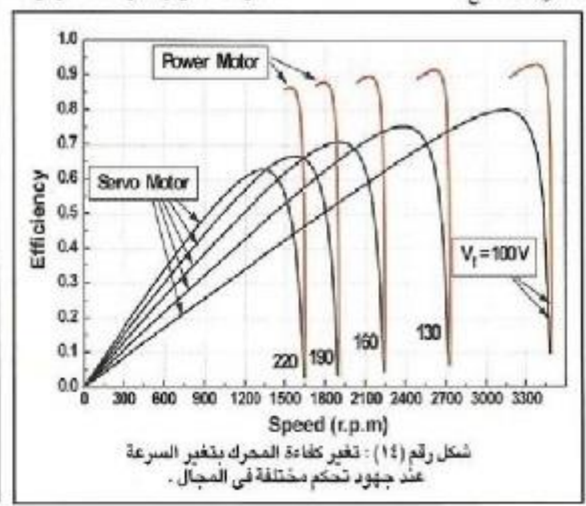
٥- قدرة جهاز التحكم والقدرة التي يتم التحكم فيها تكون صغيرة وفي حدود ١٠٪ من القدرة المناظرة مع منظومة التحكم عن طريق عضو الاستنتاج.. الأمر الذي يخفض سعر منظومة التحكم عن مثيلتها في جهد عضو الاستنتاج.

ويحتم وجود المزايا والعيوب لكل من منظومتي التحكم في تشغيل محركات التيار المستمر «السرفو» ضرورة دراسة ظروف تشغيل الحمل التي تمكن من اختيار منظومة التحكم المناسبة منهما. فإذا كان الحمل يحتاج إلى تغير السرعة خلال مدى محدود وأقصى سرعة تقل عن ١٥٠٠ لفة/دقيقة.. فيفضل استخدام منظومة التحكم في جهد عضو الاستنتاج واختيار محرك بقدرة حوالي ضعف قدرة الحمل حتى يمكن تغيير السرعة خلال المدى المحدد.. وكلما قل مدى تغير السرعة كلما أمكن استخدام محرك بقدرة أقرب إلى قدرة الحمل. أما إذا كان الحمل يحتاج إلى تغير السرعة خلال مدى كبير وإلى سرعات عالية تزيد على ١٥٠٠ لفة/دقيقة فيفضل استخدام منظومة التحكم في جهد المجال مع اختيار محرك بقدرة كبيرة في حدود ٣ أمثال قدرة الحمل.

في العدد القادم:

محركات التيار المتردد «السرفو»

شكل رقم (١٣) : تغير قدرة دخل المحرك مع تغير السرعة عند جهود تحكم مختلفة في المجال.



شكل رقم (١٤) : تغير كفاءة المحرك بتغير السرعة عند جهود تحكم مختلفة في المجال.

محركات «السرفو» التأثيرية

Induction Servo Motors

د. فتحي عبد القادر

رئيس قسم الهندسة الكهربية وأستاذ الآلات الكهربية - هندسة شبين الكوم

تتميز محركات «السرفو» التأثيرية على محركات التيار المستمر «السرفو» ببساطة التركيب وبالتالي رخص الثمن.. وبعدم وجود فرش أو عضو توحيد Commutator أو حلقات انزلاق وبالتالي عدم حاجتها تقريباً إلى الصيانة مما يزيد من عمرها.. وبصغر مفاقيد الاحتكاك مما يحسن من كفاءتها.

ولما كان من أهم متطلبات محركات «السرفو» أن تكون بأقل قيمة لعزم القصور الذاتي حتى يكون المحرك سريع الاستجابة Fast Response.. فإن محرك «السرفو» التأثيري يكون قطره صغيراً وطوله في اتجاه محور الدوران كبيراً كما في الشكل رقم (١). وهذه الأبعاد هي أهم سمة تميز الشكل الخارجي لأي نوع من محركات «السرفو» عن محركات القوى التقليدية.

ولإنقاص عزم القصور الذاتي أكثر.. يتم إنقاص وزن الجزء الدائر بجعل موصلات العضو الدائر فقط هي التي تدور.. حيث تشكل هذه الموصلات مجرد اسطوانة من الالومنيوم مفرغة ومثبتة مع عامود الدوران بواسطة قاعدة من الالومنيوم على شكل قرص في جهة واحدة.. وبذلك يصبح الجزء الدائر مثل الكوب الالومنيوم المثبت في عامود الدوران من منتصف قاعدته.. ويسمى بالعضو الدائر المفرغ Hol-low Rotor.

وكما كان في محركات التيار المستمر «السرفو».. فإن الجزء الحديدي اللازم لاستكمال مسار المجال المغناطيسي في العضو الدائر.. يكون ثابتاً مع أحد جانبي المحرك كما بالشكل رقم (١).. ولا يسمح بدورانه لكي ينقص عزم القصور الذاتي للمحرك.

والعضو الثابت للمحرك Stator

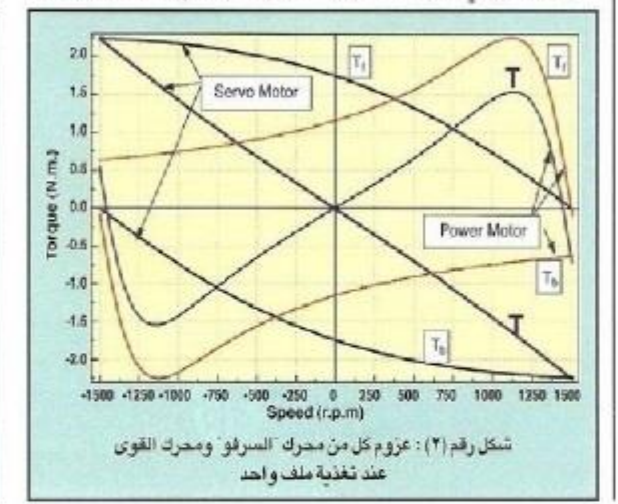
يماثل العضو الثابت لمحرك القوى التأثيري ذي الوجه الواحد.. حيث يكون من النوع الاسطواني Cylindri-cal وليس من النوع ذي الأقطاب البارزة Salient. ويوضع بالعضو الثابت مجموعتان من الملفات متعامدتان في الفراغ بنظام وضع ملفات البدء Starting والدوران Running في محرك الوجه الواحد التأثيري.. إلا أن مجموعتي الملفات متماثلتين في عدد اللفات ومساحة مقطع الأسلاك النحاسية.. بينما تختلف مجموعتا اللفات في محرك الوجه الواحد التأثيري.. وتسمى إحدى المجموعتين بملف المجال Field Coil والمجموعة الثانية بملف التحكم Control Coil كما في الشكل رقم (١).

يؤدي الشكل الاسطواني المفرغ للعضو الدائر في محركات «السرفو» التأثيرية إلى زيادة مقاومة العضو الدائر إلى نحو عشرة أضعاف قيمتها في محركات القوى التأثيرية. وهذه الزيادة في المقاومة لازمة لتحقيق هدفين أساسيين.. الأول جعل منحنى عزم المحرك مع السرعة يميل بحيث يكون أداء المحرك مستقراً Stable عند أية سرعة من الصفر حتى سرعة التزامن كما في الشكل رقم (٢).. بينما كانت منطقة الاستقرار في محرك القوى قرب سرعة التزامن فقط كما بالشكل. والهدف الثاني من زيادة مقاومة العضو الدائر.. هو إنقاص تيارات المحرك عند البدء حتى يتحمل تكرار البدء Multy Starting دون الحاجة لأي وسيلة بدء دوران كما بالشكل رقم (٣).

شكل رقم (١): محرك "السرفو" التأثيري ذو العضو الدائر المفرغ

يبين الشكل رقم (٢) عزوم كل من محرك «السرفو» التأثيري ومحرك الوجه الواحد التأثيري عندما يتم تغذية ملف واحد فقط في أي من المحركين من مصدر تيار متردد.. حيث ينشأ مجال مغناطيسي متغير القيمة والاتجاه ويقع في محور واحد في الفراغ هو محور الملف، ويسمى هذا المجال بالمجال المتذبذب Pulsating Field الذي يمكن تحليله إلى مجالين كل منهما دائري في الفراغ وثابت القيمة Cir-cular Rotating Field يدور أحدهما بسرعة التزامن في اتجاه دوران العضو الدائر ويسمى بالمجال الأمامي Forward وينتج عزماً أمامياً T_f. والمجال الثاني يدور بسرعة التزامن أيضاً ولكن في عكس اتجاه دوران العضو الدائر ويسمى بالمجال الخلفي Backward الذي ينتج عزماً خلفياً T_b.. وتكون محصلة العزمين الأمامي والخلفي هي العزم الكلي T.

ومن المهم.. ملاحظة الفرق بين العزم الكلي لكل من محرك القوى ومحرك «السرفو».. حيث نجد أن العزم الكلي لمحرك القوى موجب بينما يكون العزم الكلي لمحرك «السرفو» سالب.. بمعنى أنه عند تغذية ملف واحد فإن العزم الكلي عند بدء الدوران يساوي الصفر لأي من المحركين.. ولكن بمحاولة إدارة محرك القوى بأية وسيلة حتى ولو باليد فإن المحرك يمكنه استكمال الدوران والعمل. أما محرك «السرفو» فإنه ينتج عزماً كلياً فرملياً يعمل على إيقاف المحرك عند أية محاولة



شكل رقم (٢): عزوم كل من محرك "السرفو" ومحرك القوى عند تغذية ملف واحد



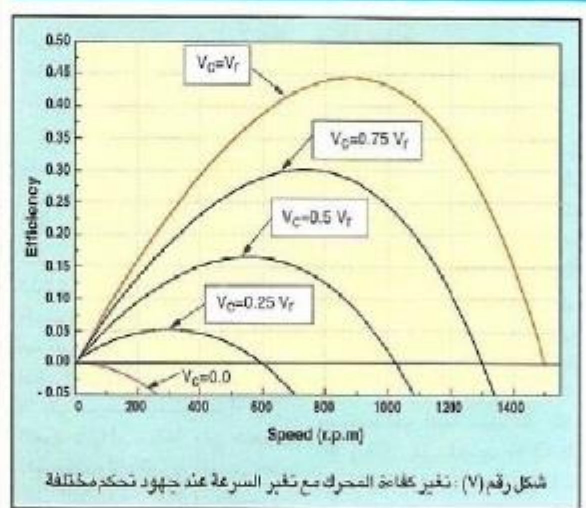
شكل رقم (٣): تيار كل من محرك "السرفو" ومحرك القوى عند تغذية ملف واحد



منظومة التحكم.

ومن الخواص الهامة في محركات «السرفو» قيمة معدل تغير السرعة بالنسبة لجهد التحكم dN/dV_C. وكلما كان هذا المعدل ثابتاً عند كل عزم وبنفس القيمة مع تغير العزوم على المحرك.. أدى ذلك إلى تحسن أداء منظومة التحكم وتبسيطها ونقص نسبة الخطأ في الوصول إلى السرعة المطلوبة.. ويتضح ذلك من المنحنيات المبينة في الشكل رقم (٦).. حيث كلما كان تغير السرعة مع تغير جهد التحكم خطياً كان معدل التغير dN/dV_C ثابتاً، وكلما كانت المنحنيات عند العزوم المختلفة متوازية بقي معدل التغير dN/dV_C واحداً لجميع العزوم، ويلاحظ أن خواص محرك «السرفو» التأثيري بمنظومة التحكم في قيمة الجهد V_C.. يؤدي إلى خواص قريبة من الخطية ومن الثبات مع تغير العزوم خصوصاً عندما يكون المحرك محملاً وليس بدون حمل.

تتغير كفاءة المحرك مع تغير السرعة عند جهود التحكم المختلفة كما بالشكل رقم (٧).. حيث تزداد مع زيادة جهد التحكم لزيادة العزم وبالتالي قدرة الخرج. ويلاحظ أن كفاءة محرك «السرفو» التأثيري تكون منخفضة لأن المحرك يعمل عند انزلاق Slip كبير كما أن مقاومة العضو الدائر كبيرة.. ولكن يتم التضحية بانخفاض الكفاءة للحصول على محرك يعمل مستقراً خلال كل المدى لتغير السرعة من الصفر وحتى سرعة التزامن وكذلك لسرعة الاستجابة والخطية في الخواص.. وكلها خواص لازمة لمحركات «السرفو». وبمقارنة هذه الكفاءة مع حالة محركات التيار المستمر «السرفو» - العدد ٦٤- نجد أن كفاءة محرك التيار المستمر «السرفو» أعلى من كفاءة المحرك التأثيري «السرفو».



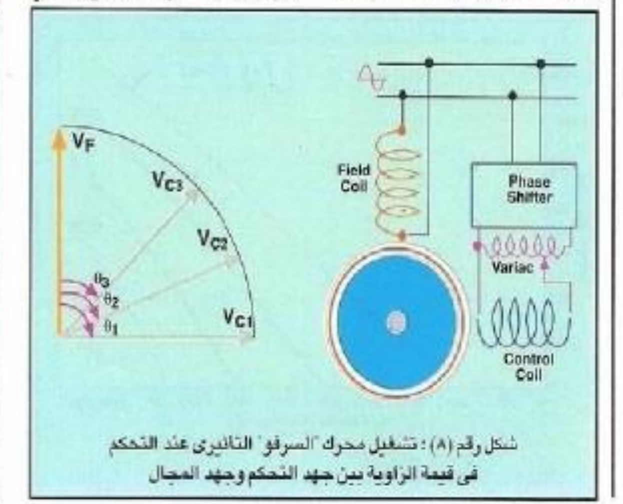
شكل رقم (٧) : تغير كفاءة المحرك مع تغير السرعة عند جهود تحكم مختلفة

٢- التحكم في زاوية جهد ملف التحكم Phase Control:

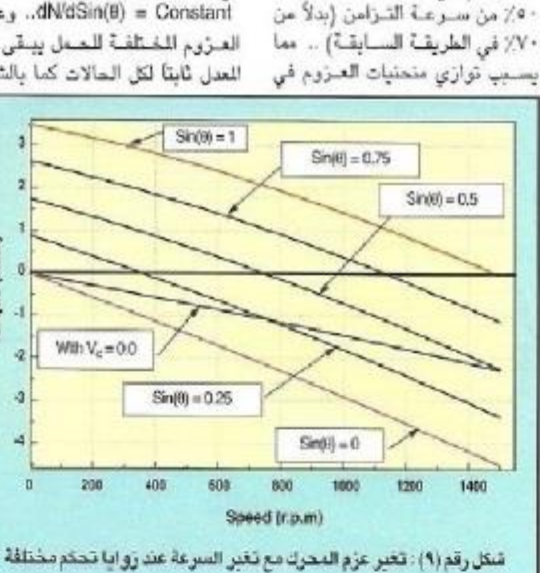
في هذه الطريقة.. يتم تثبيت قيمة جهد ملف التحكم V_C بدلاً من تغييره كما في الطريقة السابقة. وللتحكم في المحرك.. يتم تغيير الزاوية الزمنية θ بين جهد التحكم V_C وجهد المجال V_F بدلاً من تثبيتها عند ٩٠° في الطريقة السابقة.. ويتم تغيير θ من الصفر حتى ٩٠°.

ونحتاج في هذه الحالة إلى وحدة الإزاحة Phase Shifter مع ملف التحكم بحيث تكون قابلة لتغيير θ من صفر إلى ٩٠°.. بينما كانت هذه الوحدة في الطريقة السابقة تثبت θ عند ٩٠°. ويتم الاستغناء عن مغير الجهد Variac الذي كان يستخدم في الطريقة السابقة.. ويبقى ملف المجال متصلاً مباشرة وباستمرار مع المنبع كما كان في الطريقة السابقة - شكل رقم (٨). وعندما تكون الزاوية θ تساوي ٩٠°.. أي أن Sin (θ) =1.. فإن أداء المحرك يماثل تماماً أداء المحرك بطريقة التحكم السابقة عند جهد التحكم $V_C = V_r$ ونحصل على منحنى لعزم المحرك مع السرعة - شكل رقم (٩)- مماثل تماماً للطريقة السابقة - شكل رقم (٥)- حيث ينشأ مجال مغناطيسي دائري منتظم Circular Rotating Field. ولكن.. عندما تكون الزاوية θ مساوية للصفر.. فإن المجال المغناطيسي يصبح Pulsating Field في محور بين الملفين.. وتكون قيمة خطوط المجال بالمجموع الجبري لمجالي الملفين وليس بالمجموع الاتجاهي.. لأن الزاوية الفراغية ٩٠° والزاوية الزمنية صفر. وعندما تزيد الزاوية الزمنية عن الصفر يكون مجموع المجالين اتجاهياً وليس جبرياً.. وتكون نتيجة جمع المجالين جبرياً عند 0 = θ سبباً في الفرق الجوهري والاساسي بين هذه الطريقة للتحكم والطريقة السابقة.. حيث يكون المجال بضعف قيمة المجال في الطريقة السابقة عندما كان جهد التحكم V_C مساوياً للصفر. وتكون النتيجة الهامة لهذه الطريقة أن منحنى عزم المحرك عند θ=0 كله سالب كما كان في الطريقة السابقة ولكن بضعف قيمة العزم لزيادة المجال إلى الضعف كما بالشكل رقم (٩) مقارناً بالشكل رقم (٥).. مما يؤدي إلى تقاطع منحنى عزم المحرك عند Sin (θ) = 0.5 (المناظر لمنحنى العزم عند $V_C = 0.5V_r$ في الطريقة السابقة) مع محور السرعة عند ٥٠٪ من سرعة التزامن (بدلاً من ٧٠٪ في الطريقة السابقة) .. مما يسبب توازي منحنيات العزوم في هذه الطريقة .. أي تساوي ميول المنحنيات dT/dN مما يحسن من أداء منظومة التحكم في هذه الطريقة بأفضل من الطريقة السابقة. ويوضح الشكل رقم (٩) خواص المحرك عند قيم مختلفة للزاوية θ . وبالنظر إلى الجزء الموجب من منحنيات العزوم بهذه الطريقة.. نجد أن عزوم محرك «السرفو» التأثيري تتماثل مع عزوم محرك التيار المستمر «السرفو» بمنظومة التحكم في جهد عضو الاستنتاج.. وهي خواص خطية ثابتة الميول كما يجب أن تكون مع محركات «السرفو».

وقد أدى التحسن بهذه الطريقة للتحكم إلى العلاقات الخطية لتغير السرعة مع تغير معامل التحكم في هذه الطريقة وهو Sin (θ) لأن عزم المحرك يتناسب مع Sin(θ) وليس مع θ.. وتغير السرعة مع هذا المعامل كما في الشكل رقم (١٠) وفيه نجد أن dN/dSin(θ) = Constant.. وعند العزوم المختلفة للحمل يبقى هذا المعدل ثابتاً لكل الحالات كما بالشكل



شكل رقم (٨) : تشغيل محرك "السرفو" التاثيرى عند التحكم فى قيمة الزاوية بين جهد التحكم وجهد المجال



شكل رقم (٩) : تغير عزم المحرك مع تغير السرعة عند زوايا تحكم مختلفة

وهو مــا يمثل أداءً جــيداً لمحــرك «الســرفــو» بهــذه المنظومــة للتــحكم مقــارنة بالمنظومة السابق كمــا يتبين من مقارنة الشكلين (٦، ١٠).

وتتــغيــر كفــاءة المحرك بمنظومــة التحكــم في زاوية جهد ملف الــتحكم كما بــالشكل رقم (١١) حيث ينطبق منحنــى الكفــاءة عند $Sin(\theta)=1$ مع منحنى الكفاءة عند $V_C = V_r$ لتماثل الحالتين.. بينما تنــخفض الكفاءة عند $Sin(\theta) = 0.5$ عن الكفاءة عند $V_C = 0.5V_r$ وذلك لأن قــدرة دخــل ملف التــحكم تبقى ثابتــة تقــريباً بتــغيــر الزاوية θ من ٩٠° إلى أية قيمة حتى الصفر بســبب ثبات قيمــة جهد ملف التحكم. أما بمنظومة التحكم في قيمة جهــد التحكم.. فــإن قدرة دخل ملف التحكم تنقص بنقصــان جهد التحكم مما يؤدي إلى تحســن كفــاءة المحرك مع منظومــة التحكم في قيمة جــهد التحكم عن منظومة التحكم في زاوية جهد التحكم.

٣- الــتحكم في قــيمة الجــهد مع تغيــر الزاوية Amplitude and Phase Control:

تتــميــز هذه الطريقــة ببســاطة التكوين حيث تم الاستغناء عن وحدة الإزاحة Phase Shifter واســتخدام مكثف بالتوالي مع ملف المجال يتولى إيجاد الزاوية الزمنية بين جهد المجال وجهد التحكم.. ويستخدم منظم جهد Variac مع ملف التحكم كما بالشكل رقم (١٢).

وباســتخدام قيمــة مناسبة لســعة المكثف.. يمكن الحــصــول على زاوية زمنية ٩٠° بــين مجالي ملف الــتحكم وملف المجال.. وكذلــك الحصول على جهــد لملف المجال V_F مســاو لقيــمة الجــهــد المقنن لملف التــحكم $V_C = V_r$ حــتي نــحــصل على مــجــال دائري منــتظــم Circular Rotating Field بقيــمة مــساوية للطريقــة الأولى عند $V_C = V_r$ ومــساوية للطريقــة الثانيــة عند $\theta=90$ .. حــيث تــكون عــزوم المحرك بأكبر قيم موجبة.. وتتساوي هذه العزوم للطرق الثلاث للتحكم.

يظهــر تــأثيــر المكثــف من رسم التــجهــات المبين في الشكل رقم (١٢) بأخذ اتجاه تيار المجال I_F في الاتجاه الأفقي.. ويكون في اتجاهه قيمة الجهد $I_F R_{FW}$ حيث R_{FW} هي المقاومة الكلية المكافــئة لــلف المجال. وبجــمع قــيمــة الجــهــد $I_F X_{FW}$ .. حــيث X_{FW} هي الممانــعة الكليــة المكافئة لــلف المجال.. نحــصل على جــهــد ملف المجــال V_F. وبجــمع جهــد المكثف $I_F X_{CF}$.. حيث X_{CF} هي ممانعة المكثــف.. نحصل على جهد المنبــع V والــذي هو نفسه الجهد المقنن V_r لملف التحكم.

ويلاحظ.. أن قــيــمــة V_F ســوف تتســاوى مع قيمة جهد المنبع V برغم أن $V_F=V-I_F X_{CF}$ لأن الطرح اتجــاهي وليس جبــرياً. ويحدث هذا التــساوي عندما تكون الزاوية بين V_F والجهــد $I_F R_{FW}$ بمقــــدار ٤٥° والزاويــة بين V_F والجهــد V بمقدار ٩٠°. وفي هذه الحالة.. ونظراً لتساوي جهدي الملفين V_F ، V_C وتماثل تكوين الملفين.. فإننا نحــصل على المجــال الدائري المــاثل تمامــاً للمــجــال الدائري الــناتــج من الطريقة الثانيــة للتحكم عند $\theta = 90$ ، ويكون تيار ملف التحكم I_C مســاوياً لتيــار ملف المجال I_F وبينهــما زاوية ٩٠° لتســــاوي المقــاومــة المكافــئــة والممانعة المكافــئة للملفين حيث يكون المجال الكلي دائرياً منتظمًا.

وللــتحكم في سرعة المحــرك.. يتم إنقــاص السرعة بــإنقاص الجــهد V_C عن قيمــة الجهد V باستخــدام مغير الجهد فيتغير كل من التيار I_F والتيار I_C تبعاً لقيمة عزم الحمل.. ولكن تغير الســرعــة يؤدي إلى تغــيــر كل من المقاومة المكافــئة للملفين R_{CW}، R_{FW} والممانعة المكافئة للملفين X_{CW} ، X_{FW} مما يسبب نقص الزاوية بين التيارين I_F ، I_C عن ٩٠°.. ولهذا يصبح التحكم بهذه الطريقــة تحكمًا في قــيمة جــهد التحكــم مؤدياً إلى تغيــر الزاوية بين تيــاري الملفين وبالــتــالي الزاوية بين جهدي الملفين V_F، V_C.

ولهذا.. فإن خواص الأداء للمحرك بهــذه الطريقــة للــتحكم يجــمع بين خــواص الأداء بــالطريقـــة الأولى وخواص الأداء بالطريقة الثانية.

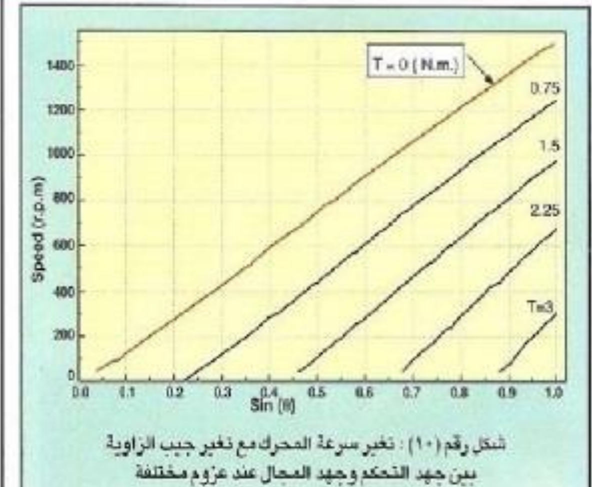
وبعد.. فــقد قــدمنا أهم نوعين من محركات «السرفــو».. وهــما محركات «الســرفــو» ذات الــتيــار المســتــمــر ومــحــركات الــســرفــو» الــتــأثــيرية. وتســتخــدم على نطاق ضــيق أنواع أخرى من مــحركات «السرفــو» مثل مــحــركات المــمانعــة المغناطــيســيــة ومــحــركــات الــتــعــويق المغناطيــسي والمحـــركــات الخــطويــة.. وهــذه ســوف نتناولها بمشيئة الله في أعداد قــادمــة تحت عــنوان «المحــركــات الخاصــة».

كمــا نود أن نشير.. إلى أن تعبــير «تشــغــيــل الســرفــو Servo Drive» أصبح يستخــدم كثيراً في هذه الأيام مع محــركات القــوى.. ولا يعني ذلك أن محرك القوى أصبح يعمل كمحرك «سرفــو».. ولكن هذا التــعبيــر يطلق عندمــا تصــبح وســيلــة الــتحكم في مــحرك القــوى سريــعة الاســتجــابة للتــغيــرات التــي تطرأ على المحــرك وبالتــالي تجــعل المحــرك ســـريع الاســتجابة لــتغيــر الســرعة عندما يطلب ذلــك.. وســريع الاســـتــجــابة لتثبيت السرعة عند القيمة المطلوبة إذا حدث أي تغير مفاجئ في عزم الحمل بالزيادة أو النقصان.

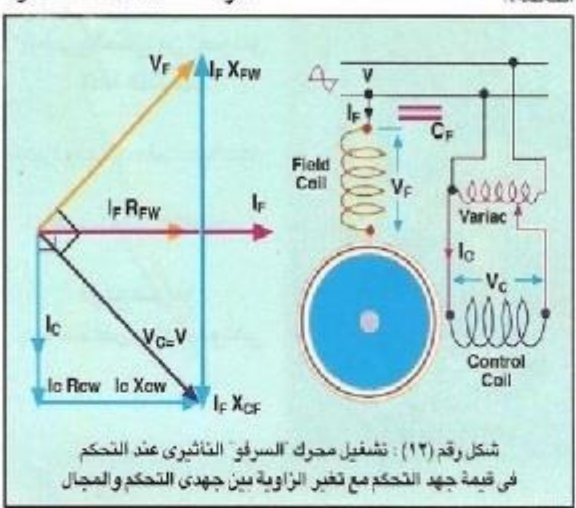
وقد أصــبحت سرعــة الاســتجابة هذه سهلة المنال بعــد التطور السريع في سرعــة أداء الحسابات وتعــديلها بالحــاســبــات الإلكــترونيــة الحديثــة وباســتــخــدام أنواع خــاصـــة من الترانزســتــور سريع الاســتــجــابة للتوصيل والفصل.

في العدد القادم:

مــولـــــدات «التـــــاكو»



شكل رقم (١٠) : تغير سرعة المحرك مع تغير جيب الزاوية بين جهد التحكم وجهد المجال عند عزوم مختلفة



شكل رقم (١٢) : تشغيل محرك "السرفو" التأثيري عند التحكم في قيمة جهد التحكم مع تغير الزاوية بين جهدى التحكم والمجال

شكل رقم (١١) : تغير كفاءة المحرك مع تغير السرعة عند زوايا مختلفة

مولـــدات «التـــاكـو» Tachogenerators

د. فتحي عبد القادر
رئيس قسم الهندسة الكهربية وأستاذ الآلات الكهربية - هندسة شبين الكوم

سبق الحديث عن منظومات مختلفة للتحكم في المحركات الكهربية.. مثل التحكم في السرعة أو خلال فترة بدء الدوران أو خلال فترة التوقف. وفي منظومات التحكم هذه. تكون هناك حاجة لقياس سرعة دوران المحرك والحصول من وسيلة القياس على جهد كهربي يتناسب مع السرعة. وهذا الجهد.. إما أن يوصل بجهاز قياس السرعة Tachometer لمعرفة قيمة السرعة.. أو يدخل في دائرة التغذية الخلفية Feedback في منظومة التحكم لتتم مقارنته بجهد أساسي مكافئ للسرعة المطلوبة Speed Reference كما بالشكل رقم (١).

وهذه الوسيلة التي تعطي جهدًا يتناسب مع السرعة الفعلية للمحرك.. هي مولد «التاكو» Tachogenerator الذي يمثل مكونًا رئيسيًا من مكونات منظومة التحكم. وهو يختلف كثيرًا عن المولد الكهربي التقليدي Power Generator الذي يجب أن تتحقق فيه الشروط التالية لكي يعمل كمولد «تاكو»:

١- أن لا يمثل عبأ تحميل ميكانيكي على الأجزاء الدوارة المطلوب التحكم فيها. أي لا يستهلك قدرة ميكانيكية من المنظومة بقدر الإمكان.

٢- أن يكون عزم القصور الذاتي للمولد صغيرًا جداً حتى لا يؤثر على الأداء الديناميكي لمنظومة التحكم بزيادة فترة التأرجح للوصول إلى حالة الاستقرار.

٣- أن يكون ثابت الزمن الكهربي Time Constant L/R صغيرًا بقدر الإمكان حتى ينقص زمن الفترات الانتقالية Transient Periods مما يحسن من أداء منظومة التحكم.

٤- أن تكون العلاقة بين سرعة الدوران وجهد خرج المولد علاقة خطية.

٥- أن تكون نسبة الخطأ في قيمة جهد خرج مولد «التاكو» - عن العلاقة الخطية - أقل ما يمكن Minimum Amplitude Error.

٦- أن تكون نسبة الخطأ في زاوية جهد خرج المولد أقل ما يمكن Minimum Phase Error وذلك في مولدات «التاكو» التي تعطي جهدًا مترددًا.

وسوف نرى فيما بعد.. كيف تتحقق هذه الشروط في الأنواع المختلفة لمولدات «التاكو».

أ- مولد «التاكو» ذو التيار المستمر DC Tachogenerator:

يتركب المولد من نفس أجزاء مولد التيار المستمر التقليدي.. إلا أن أقطابه لا يتم تغذيتها من مصدر خارجي أو من نفس المولد.. ولكن النوع الأكثر شيوعاً تكون أقطابه من النوع ذي المغناطيس الدائم Permanent Magnet وذلك لتبسيط مكوناته.. وهذه الأقطاب تكون في العضو الثابت للمولد Stator.

أما العضو الدائر Rotor.. فهو يمثل عضو الاستنتاج Armature الذي نأخذ منه جهد خرج المولد. ولكي ينقص عزم القصور الذاتي للمولد.. فإن عضو الاستنتاج يكون من النوع المفرغ Hollow Rotor كما بالشكل رقم (٣).. حيث تثبت جميع ملفات عضو الاستنتاج على السطح الخارجي لاسطوانة مفرغة من الالومنيوم على شكل كوب يثبت مع محور الدوران وتتصل أطراف الملفات بعضو التوحيد Commutator المثبت مع محور الدوران.. وبذلك تدور ملفات عضو الاستنتاج وعضو التوحيد فقط.. ويبقى الجزء الحديدي الموجود داخل أسطوانة ملفات عضو الاستنتاج ثابتًا دون دوران لإنقاص قيمة عزم القصور الذاتي للمولد. وهذا الجزء الحديدي لازم لاستكمال الدائرة المغناطيسية لمجال الأقطاب.. كما أن المولد يكون قطره صغيرًا وطوله كبيرًا في اتجاه محور الدوران وذلك أيضًا لإنقاص عزم القصور الذاتي.

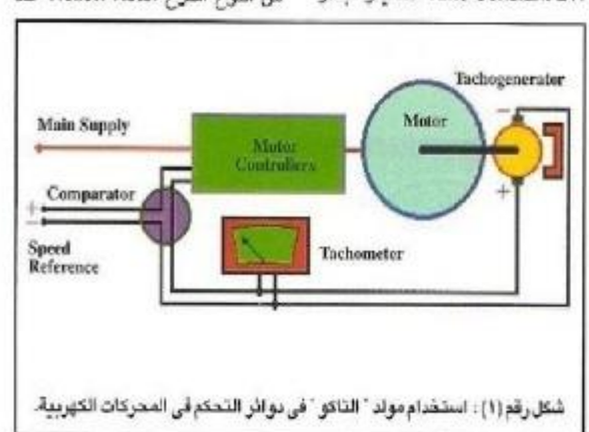
وهناك شكل آخر لمولد التيار المستمر «التاكو».. حيث يكون عضو الاستنتاج على شكل قرص من «الفيبر» تلصق عليه لفات عضو الاستنتاج والتي تتصل بعضو التوحيد المثبت على نفس القرص.. وبذلك يكون الجزء الدائر هو القرص فقط بما عليه من موصلات عضوي الاستنتاج والتوحيد. وهكذا.. يصبح وزن العضو الدائر وبالتالي عزم القصور الذاتي أقل ما يمكن. أما الأقطاب.. فتتكون من المغناطيس الدائم التي تشكل هي الأخرى على شكل قرص في كل من جهتي قرص عضو الاستنتاج كما بالقطاع المبين بالشكل رقم (٣).

ونلاحظ.. أن القوة الدافعة الكهربية E المستنتجة في مولدات التيار المستمر تتناسب مع سرعة الدوران N ومجال الأقطاب ϕ.. أي أن $E \propto N\phi$. وحيث أن مجال الأقطاب ϕ ثابت لأن الأقطاب مغناطيس دائم.. فإن $E \propto N$.. أي أن القوة الدافعة الكهربية المستنتجة بالمولد تتناسب خطيًا مع السرعة.. وهذا شرط أساسي يجب أن يتحقق في مولدات «التاكو».

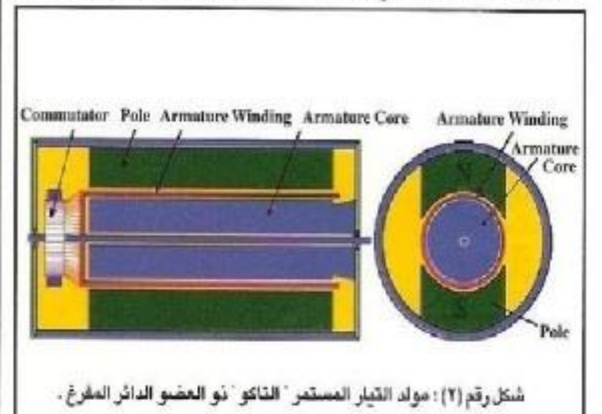
أما المشاكل التي تظهر في هذا النوع من المولدات.. فتتمثل في:

١- ظهور تذبذبات Ripples في جهود الخرج تكون قيمتها واضحة في السرعات البطيئة كما في الشكل رقم (٤) الذي يبين تغير قيمة جهد الخرج مع الزمن عند سرعة دوران ١٥٠ لفة/دقيقة.. حيث يكون الجهد عبارة عن جزء تيار مستمر ثابت القيمة محملاً بجزء آخر تيار مستمر متغير القيمة. وهذا التذبذب ناتج من عمليات التوحيد التي يقوم بها عضو التوحيد Commutator لجهود ملفات عضو الاستنتاج.. حيث تكون جهود هذه اللفات بشكل متردد AC. ولإنقاص قيمة هذه التذبذبات.. يجب زيادة عدد ملفات عضو الاستنتاج وبالتالي عدد قطع عضو التوحيد. وكذلك.. يجب عمل ميل Skewing في ملفات عضو الاستنتاج بدلاً من أن تكون موازية لمحور الدوران.. كما أن زيادة طول الثغرة الهوائية في الدائرة المغناطيسية بين الأجزاء الدوارة والأجزاء الثابتة يؤدي إلى إنقاص هذه التذبذبات.

ومع زيادة سرعة دوران المولد.. تتضاءل قيمة هذه التذبذبات بالنسبة



شكل رقم (١): استخدام مولد "التاكو" في دوائر التحكم في المحركات الكهربية.



شكل رقم (٢): مولد التيار المستمر "التاكو" ذو العضو الدائر المفرغ.

للجهد الرئيسي ثابت القيمة ويتحسن شكل الجهد كما بالشكل رقم (٥). ويؤدي ظهور هذه التذبذبات إلى مشاكل لمنظومة التحكم حيث تتغير قيمة جهد خرج مولد «التاكو» من لحظة إلى أخرى برغم ثبات السرعة.. فيصعب تحديد قيمة السرعة الفعلية.

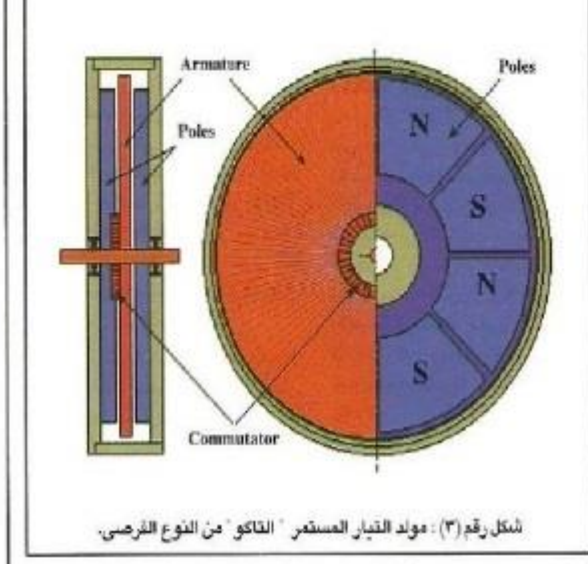
٢- اختلاف جهد خرج المولد مع ثبات السرعة (حتى وإن كانت السرعة عالية) باختلاف قيمة التيار المأخوذ من المولد والمار بدائرة التحكم. وهذا الاختلاف هو ما يعبر عن الخطأ في قيمة الجهد Amplitude Error وهو الناتج من هبوط الجهد في مقاومة عضو الاستنتاج. فإذا كان جهد الخرج عند اللاحمل Vn.. فإنه بتوصيل المولد إلى الحمل الذي هو دائرة التحكم.. فإن جهد الخرج ينخفض بحيث يصل إلى Vl.. حيث أن Vl=Vn-IR عندما يكون التيار هو I ومقاومة عضو الاستنتاج هي R. ولخفض هذا الخطأ.. يجب أن تأخذ دائرة التحكم تيارًا بأقل قيمة ممكنة.. وهو ما يتحقق مع أجهزة القياس والتحكم الإلكترونية الحديثة. ويوضح الشكل رقم (٦) الاختلاف في قيمة جهد الخرج مع تغير السرعة عند قيم مختلفة لمقاومة دائرة الحمل على مولد «التاكو». حيث ينخفض الجهد كلما نقصت مقاومة الحمل التي تعني زيادة التيار.

ويمكن حصر العيوب الرئيسية لمولد التيار المستمر «التاكو» في وجود التذبذبات في جهد الخرج، وكذلك وجود الخطأ في قيمة الجهد.. إلى جانب المشاكل الناتجة عن عضو التوحيد مثل الحاجة للصيانة باستمرار.. كما أن التركيب المعقد لهذا المولد يجعل ثمنه مرتفعًا. وتتركز أهم مزايا هذا المولد في العلاقة الخطية للجهد مع السرعة.. وعدم وجود خطأ في زاوية الجهد.

وعلى الرغم من الاستخدام الأساسي لمولدات «التاكو» في قياس سرعة الدوران.. إلا أنها تستخدم أيضًا في قياس العجلة Acceleration وذلك بتوصيل مقاومة ومكثف بالتوالي على أطراف خرج المولد.. وتوصيل جهاز قياس العجلة Accelerometer على طرفي المقاومة كما بالشكل رقم (٧). فإذا كانت سرعة الدوران ثابتة.. فإن جهد المولد يكون ثابت القيمة ولا يمر تيار في المقاومة R.. وبالتالي يكون جهد الخرج على أطراف المقاومة «صفر» بما يعني أن العجلة تساوي «صفر».. ويكون المكثف مشحونًا بجهد يساوي جهد المولد. وعند تزايد السرعة.. يكون للعجلة قيمة تزايدية تظهر على أطراف الخرج على المقاومة لمرور تيار شحن المكثف. وكلما كان معدل زيادة السرعة كبيرة.. كان تيار الشحن أكبر وقيمة العجلة أكبر. ومع تناقص السرعة.. ينعكس اتجاه التيار حيث يفرغ المكثف شحنته وتتوقف قيمة التيار على معدل التناقص حيث تظهر قيمة العجلة التناقصية على جهاز قياس العجلة.

ب- مولد «التاكو» التأثيري Induction Tachogenerator:

يعطي هذا المولد جهدًا يتناسب مع سرعة الدوران.. ولكنه جهد متردد AC. والمهم في هذا الجهد المتردد.. أن تردده ثابت مهما تغيرت السرعة.. وهذه خاصية فريدة لا يوفرها أي مولد تيار متردد تقليدي وهذه الخاصية لابد من وجودها في مولد «التاكو» حتى يمكن مقارنة جهد المولد مع جهد السرعة القياسي Speed Reference في منظومات التحكم.



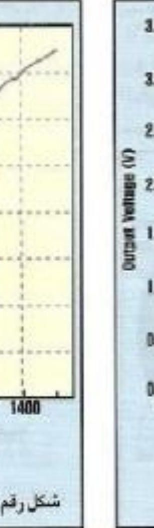
شكل رقم (٣) : مولد التيار المستمر " التاكو " من النوع القرصي.

ويتكون مولد «التاكو» التأثيري من عضو ثابت به ملفين متعامدين في الفراغ.. أحدهما يغذي من منبع تيار متردد ويمثل ملف المجال Field Winding (F).. والآخر يمثل الخرج Output Winding (O) الذي تستنتج به القوة الدافعة الكهربية التي تتناسب مع سرعة الدوران.

أما العضو الدائر المولد.. فهو يماثل العضو الدائر لمحرك «السرفو» التأثيري.. حيث يكون الجزء الدائر مجرد أسطوانة مفرغة من الألومنيوم لها قاعدة تثبت مع محور الدوران كما بالشكل رقم (٨).. ويوجد بداخل هذه الاسطوانة أسطوانة أخرى من الحديد المصمت - بها ثقب في المنتصف يكفي لمحور الدوران - تكمن أهميتها في استكمال مسار المجال المغناطيسي حتى يمكن المحافظة على قيمة خطوط المجال بأكبر عدد ممكن. وتثبت هذه الاسطوانة الحديدية في أحد جوانب المولد لكي تكون ثابتة دون دوران حتي ينقص عزم القصور الذاتي للمولد.

وعند تغذية ملف المجال من منبع متردد (٥٠ذ/ث).. فإن ملف المجال ينشئ خطوط مجال مغناطيسي تمر في اتجاه محور ملف المجال وتستكمل مسارها في العضو الدائر قاطعة الاسطوانة الألومنيوم التي هي الجزء الدائر في المولد. وهذا المجال المغناطيسي يكون متغيرًا في عدد خطوطه من لحظة إلى أخرى.. كما أن اتجاهه ينعكس لأن مصدره تيار متردد وهو ما يسمى بالمجال

شكل رقم (٤) : تذبذبات الجهد في السرعات المنخفضة .



شكل رقم (٥) : ظهور تذبذبات جهد الخرج بنسبة أكبر في السرعات المنخفضة

شكل رقم (٦) : تغير جهد الخرج مع تغير السرعة عند مقاومات حمل مختلفة.

المتذبذب Pulsating Field. ونتيجة لهذا التغيير والانعكاس.. تستنتج قوة دافعة كهربية في الاسطوانة الالومنيوم حتى ولو كانت ساكنة بنفس نظرية استنتاج القوة الدافعة الكهربية الناتجة من التحويل Trans-former e.m.f. (E_t).. ويكون ترددها مساوياً لتردد تغذية ملف المجال ولا تتغير قيمتها بتغير سرعة الدوران مادام تيارملف المجال ثابتًا.

ونظرًا لان الأسطوانة الالومنيوم تمثل لفات مقصورة على نفسها.. فإن تيارًا مترددًا يمر بالاسطوانة وينشأ عنه مجال مغناطيسي في نفس محور ملف المجال. ونظراً لأن ملف الخرج متعامد في الفراغ مع ملف المجال.. فإنه عند سكون العضو الدائر لن تستنتج بملف الخرج أي قوة دافعة كهربية برغم وجود مجال مغناطيسي من ملف المجال ومن اسطوانة العضو الدائر.. لان هذين المجالين متعامدين على ملف الخرج.

وعند دوران العضو الدائر.. تظل E_t في الاسطوانة الألومنيوم باقية.. إلا أن قوة دافعة كهربية أخرى تستنتج بالاسطوانة من الدوران وتسمى Rotational e.m.f.(E_r) تتزايد قيمتها خطيًا مع زيادة السرعة. وبرغم تغير قيمتها.. فإن ترددها يبقي ثابتًا عند نفس قيمة تردد تغذية المجال. وتتميز E_r عن E_t بأن المجال المغناطيسي الناتج عنها يكون محوره عموديًا على محور ملف المجال.. أي في اتجاه محور ملف الخرج.

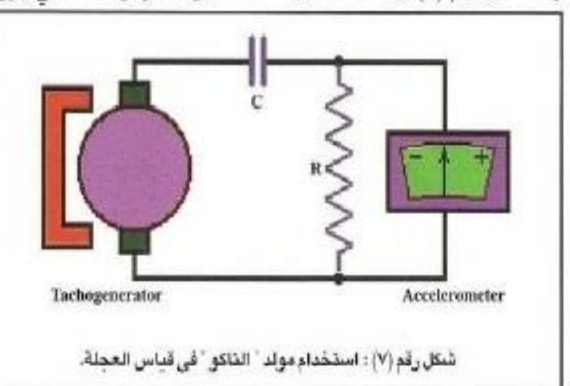
وبطريقة أخرى.. فإنه يمكن تمثيل اسطوانة العضو الدائر بملفين ثابتين في الفراغ مهما تغيرت السرعة.. كلاهما مقصور على نفسه.. أحد هذين الملفين D يكون محوره في اتجاه ملف المجال.. والثاني Q يكون محوره في اتجاه ملف الخرج كما بالشكل رقم (٩). وعند سكون العضو الدائر.. تستنتج بالتحويل E_{tD} في ملف العضو الدائر D.. ولا يستنتج أي شيء في الملف Q لأنه متعامد على كل من مجال الملف D ومجال الملف F. أما عند الدوران.. فإن E_{tD} تبقى موجودة كما هي في الملف D.. وتظهر القوة الدافعة الكهربية من الدوران E_{rQ} في الملف Q بعد أن كانت «صفر» عند السكون. وتتزايد E_{rQ} خطيًا مع زيادة سرعة الدوران ولما كان محور الملف Q في اتجاه محور ملف الخرج O.. فإن تيار ومجال الملف Q ينتجان قوة دافعة كهربية بالتحويل E_{tO} في ملف الخرج، وهكذا.. يكون خرج المولد E_{tO} ناتجاً بالتحويل من جهد ناتج من الدوران E_{rQ}. وهكذا.. يكون خرج المولد متناسبًا مع سرعة الدوران. ويلاحظ.. أن جميع الجهود المستنتجة تكون جيبية Sinusoidal وثابتة التردد مثل جهد تغذية ملف المجال.. مهما تغيرت سرعة الدوران.

وبزيادة سرعة الدوران.. يزداد جهد خرج مولد «التاكو» التأثيري زيادة خطية كما بالشكل رقم (١٠).. إلا أنه في السرعات العالية لا يبقى تيار ملف المجال ثابتًا رغم ثبات جهده.. بل يتناقص بتأثير زيادة تيار ومجال الملف Q.. مما يؤدي في النهاية إلى تناقص جهد الخرج عن القيمة الخطية كما بالشكل. وعند تحميل المولد.. يتناقص جهد الخرج مرة أخرى بسبب هبوط الجهد في مقاومات وممانعات المولد.. الأمر الذي يؤدي إلى الخطأ في قيم الجهد Amplitude Error.. إلا أن هذا الخطأ يكون صغيرًا إذا كان حمل مولد «التاكو» يكافئ حملاً سعويًا Capac-itive Load.. ويزداد الخطأ إذا كان الحمل يكافئ حملاً ماديًا Resistive Load.. ويزداد الخطأ أكثر إذا كان الحمل حثيًا Inductive Load كما بالشكل.

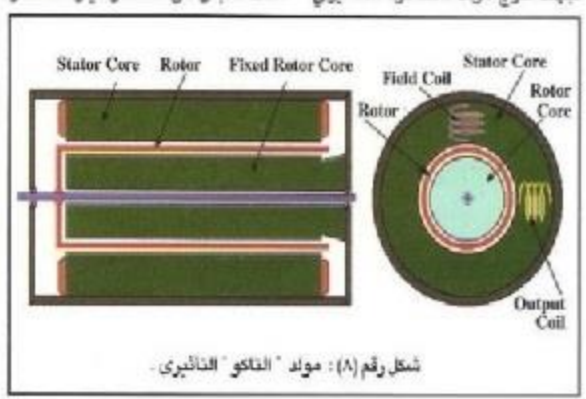
ويظهر في مولد «التاكو» التأثيري خطأ ثان.. ألا وهو الخطأ في زاوية جهد الخرج Phase Error. ويتضح ذلك من الشكل رقم (١١) الذي يبين تغذية مجال مولد «التاكو» التأثيري وتوصيل جهد الخرج V_o مع جهد السرعة القياسي V_r.. حيث يتم طرحهما ليكون الناتج هو جهد التحكم V_c. أي أن $V_c = V_r - V_o$.. حيث يتم توصيل هذا الجهد V_c إلى منظومة التحكم الرئيسية للتحكم في سرعة محرك القوى. فإذا كان V_o أقل من V_r.. فإن هذا يعني أن سرعة محرك القوى أقل من السرعة المحددة المطلوبة.. وعندئذ يكون الجهد V_c موجبًا ويعمل على زيادة سرعة المحرك إلى أن يتساوى V_o مع V_r وتبقى السرعة ثابتة على ذلك. وإذا حدث وزاد الحمل الميكانيكي على المحرك.. فإن سرعة المحرك تنخفض وبالتالي ينخفض الجهد V_o للمولد وتظهر قيمة للجهد V_c تعمل على إعادة السرعة إلى ما كانت عليه. أما عند الرغبة في زيادة السرعة أو إنقاصها.. فإننا نزيد أو ننقص الجهد V_r فتظهر قيمة للجهد V_c تعمل على زيادة أو إنقاص السرعة إلى القيمة المطلوبة. وإذا ظهر خطأ في زاوية جهد خرج مولد «التاكو» التأثيري V_o.. فإن ذلك يؤدي إلى وجود قيمة خطأ للجهد V_c. فإذا كان V_o يساوي V_r في القيمة.. وجب أن يكون V_c مساوياً «للصفر».. إلا أن وجود خطأ في زاوية موجه الجهد V_o تعني تحرك الموجه زاوية تؤدي إلى تواجد قيمة خطأ للجهد V_o تعني تحرك الموجه زاوية تؤدي إلى تواجد قيمة خطأ للجهد V_c وهو ما يسمى بالخطأ الناتج من الزاوية Phase Error. وهذا الخطأ.. ينتج من اختلاف الأحمال من مقاومة مادية إلى ممانعة حثية أو سعوية.

وبرغم هذين الخطأين في مولد «التاكو» التأثيري.. وحيث يمكن التغلب عليهما وإنقاصهما إلى أقل قيمة ممكنة.. فإن هذا المولد يتميز كثيرًا على مولد التيار المستمر «التاكو» حيث لا يوجد به عضو توحيد ولا تظهر مشاكله ولا يوجد به أي حلقات انزلاق أو فرش بما لها من مشاكل.. كما أنه أقل تكلفة وبالتالي أقل سعرًا وأطول عمرًا.

هذا.. ويمكن استخدام مولد «التاكو» التأثيري في قياس العجلة Accelerometer.. وعندئذ يتم تغذية ملف المجال من مصدر تيار مستمر



شكل رقم (٧) : استخدام مولد "التاكو" في قياس العجلة.



شكل رقم (٨): مولد "التاكو" التأثيري.

بدلاً من التيار المتردد، وعند ثبات السرعة.. يكون جهد خرج المولد «صفراً» مهما كانت هذه السرعة.. لأن القوة الدافعة الكهربية في العضو الدائر تكون ناتجة من الدوران فقط وينتج عنها مجال دائري منتظم Circular Rotating Field يدور في العضو الدائر في اتجاه مضاد لاتجاه الدوران. وهذا المجال يكون ثابتًا في الفراغ بالنسبة لأي ملف في العضو الثابت.. وبالتالي لا ينشأ من مجال العضو الدائر أية قوة دافعة كهربية في أي من ملفات العضو الثابت مثل ملف الخرج طالما كانت سرعة الدوران ثابتة.

إلا أنه بتغيير سرعة الدوران.. تتغير قيمة وسرعة المجال الدائري الناتج من العضو الدائر. لكن.. يبقى مجال العضو الدائر ثابتًا في الفراغ بالنسبة لملف الخرج.. إلا أن تغير قيمة المجال الدائري مع تغير السرعة ينتج عنه قوة دافعة كهربية في ملف الخرج تزيد قيمتها مع زيادة معدل تغير السرعة.. وبذلك يعبر جهد الخرج عن قيمة عجلة الدوران Acceleration.

جـ - مولد «التاكو» التزامني Synchronous Tachogenerator

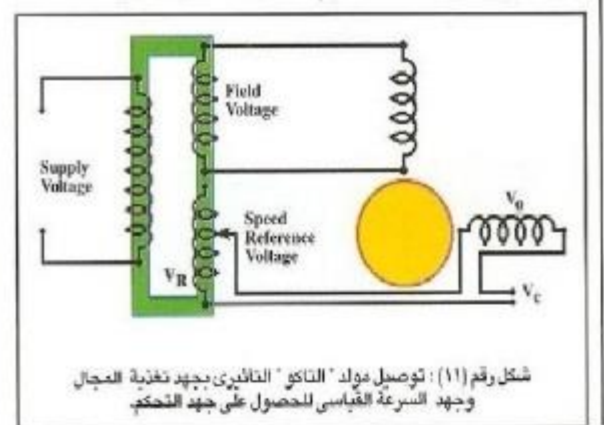
هذا المولد.. يمكن أن يكون العضو الدائر له عبارة عن الأقطاب المغناطيسية الدائمة حتى لا تحتاج إلى تيار تغذية وبالتالي لا تحتاج إلى حلقات انزلاق أو فرش. ويوضع بالعضو الثابت مجموعة واحدة من الملفات لتمثل ملف الخرج.. إلا أن جهد الخرج وإن كانت قيمته سوف تتزايد خطيًا مع السرعة.. فإن تردده سوف يتزايد خطيًا أيضًا مع السرعة. وهذا الجهد المتغير التردد لا يمكن مقارنته مع جهد السرعة القياسي V_r لاختلاف التردد من سرعة إلى أخرى. لهذا.. فإنه يتم

شكل رقم (٩): تمثيل ملفات العضو الثابت والعضو الدائر لمولد "التاكو" التأثيري.

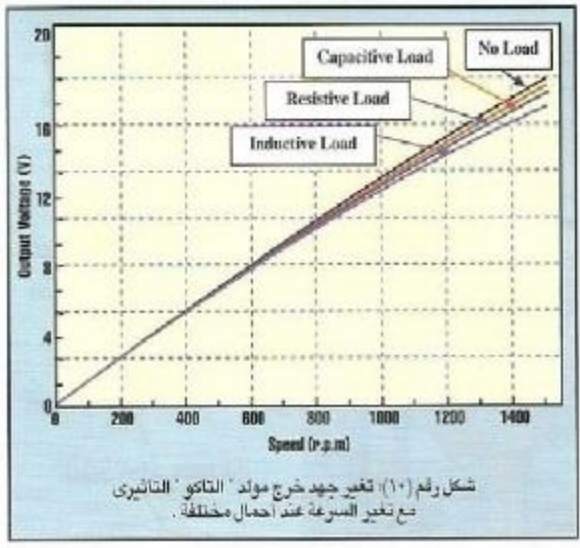
توحيد جهد الخرج لأي مولد «تاكو» تزامني إلى جهد تيار مستمر باستخدام دوائر التوحيد Rectifiers.. إلا أن هذا المولد يتميز عن المولد ذي التيار المستمر في عدم وجود عضو توحيد أو حلقات انزلاق أو فرش.. وفي هذه الحالة يفضل أن تقسم ملفات العضو الثابت إلى عدد من الأوجه لا تقل عن ثلاثة وذلك لزيادة جهد وقدرة الخرج وإنقاص التذبذبات في جهد الخرج بعد التوحيد.

وللزيادة أكثر في جهد وقدرة الخرج.. وأيضًا لإمكانية التحكم في جهد الخرج وإنقاص التذبذبات بدرجة أكبر.. يستخدم نوع خاص من المولدات التزامنية يسمى بالنوع الحثي Inductor Type. وأبرز ما في هذا النوع.. أن عدد أقطابه كثيرة لإنقاص التذبذبات.. وبرغم ذلك فإن ملفات هذه الأقطاب لا تتجاوز ملفاً واحداً أو اثنين على الأكثر. ويمكن وضع ملفي الأقطاب في العضو الدائر.. إلا أنه يفضل وضعهما في العضو الثابت حتى لا نحتاج إلى حلقات انزلاق أو فرش.

ويتكون العضو الدائر كما بالشكل رقم (١٢).. من اسطوانة من الحديد المصمت ويترك جزآن من أطراف الاسطوانة على شكل دائرة منتظمة.. أما الجزء المتوسط من الاسطوانة فيتم به تفتيح مجاري موازية لمحور



شكل رقم (١١) : توصيل مولد "التاكو" التأثيرى بجهد تغذية المجال وجهد السرعة القياسى للحصول على جهد التحكم.



شكل رقم (١٠): تغير جهد خرج مولد "التاكو" التأثيرى مع تغير السرعة عند أحمال مختلفة .

الدوران ليتم تشكيل مجاري Slots وأسنان Teeth.. حيث يشكل مجموع عدد المجاري وعدد الأسنان عدد الأقطاب للمولد.

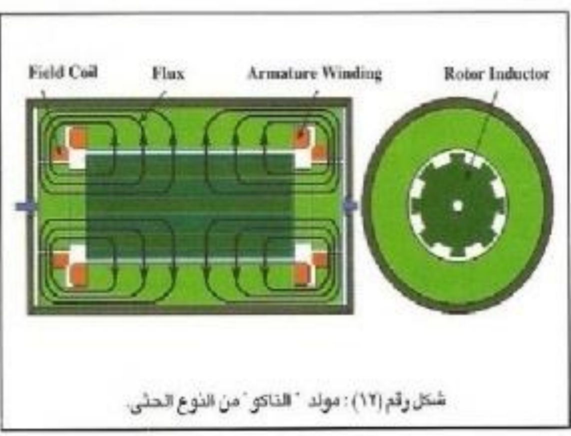
أما العضو الثابت.. فتوضع به مجموعة ملفات الخرج بالطريقة التقليدية.. مع الأخذ في الاعتبار أن الخطوة القطبية تساوي عرض السنة أو المجرى للعضو الدائر حيث يتساوى عرض السنة مع عرض المجرى. كما يوضع بالعضو الثابت ملفا تغذية الأقطاب ويتم لف كل ملف بحيث يكون محوره هو محور دوران المولد.

ويتم تغذية ملفي الأقطاب المثبتين بالعضو الثابت.. بالتيار المستمر حيث ينشأ عنهما مجال مغناطيسي في اتجاه محور الدوران. ولكي يصل هذا المجال إلى ملفات الخرج في العضو الثابت.. يجب أن يكن مجال ملف الأقطاب الأول مضادًا لمجال ملف الأقطاب الثاني حتى ينتشر المجال خارجًا من الجزء الأوسط بالعضو الدائر إلى ملفات الخرج بالعضو الثابت. وتنشأ الأقطاب من اختلاف كثافة المجال المغناطيسي حتى تكون بأكبر قيمة لها خلال كل سنة من أسنان العضو الدائر.. كما تكون كثافة المجال بأقل قيمة خلال كل مجرى من مجاري العضو الدائر، وبذلك.. تشكل كل سنة قطبًا ذا مجال كبير.. وكل مجرى قطبًا ذا مجال صغير. وعندما تتعرض ملفات الخرج لمجال مغناطيسي ذي كثافة عالية ثم آخر ذي كثافة أقل.. تستنتج بها القوة الدافعة الكهربية المطلوبة.. وتكون بشكل تيار متردد يتم توحيده للحصول على جهد مستمر.

وهذا المولد.. يكون جهده خطيًا مع تغير السرعة.. وتكون نسبة التذبذبات به أقل من الأنواع الأخرى بل وأقل من مولد التيار المستمر «التاكو».. كما أن نسبة الخطأ في قيمة الجهد Amplitude Error أقل من الأنواع الأخرى.

العدد القادم:

المحركات الخطية



شكل رقم (١٢) : مولد "التاكو" من النوع الحثي.

المحـــركات الخطيـــة Linear Motors

د. فتحي عبد القادر
رئيس قسم الهندسة الكهربية وأستاذ الآلات الكهربية - هندسة شبين الكوم

يتكون أي محـــرك كـهـربي من جزئين.. جـزء ثابت وآخر متـحـرك.. والجزء المتحرك في مـعظم المحركات الكهـربيـة يتـحـرك حـركة دورانيـة تناسب مـعظم الأحـمـال الميكانيكيـة.. وفي بعـض المحـركـات (الخطيـة) يتحرك الجـزء المتحرك حركـة خطية أفقية أو رأسية أو مائلة لتناسب عدداً من الاسـتـخـدامـات يكون مـعظمهـا داخل المصانـع لنقل أجزاء المنتـجات في مراحل التصنيـع المختلفة أو نقل الخـامـات المتنوعـة والتي يكون من الأفضل نقلها بهذه المحركات الخطية التي تكون على شكل سيور مـعدنية تختلف كـثيـراً عن السيور المطاطية التي تحركها محركات دوارة تقليدية.

والمحـركـات الخطيـة تتـعـدد من ناحـيـة الشكل ونظـرية العمل بحـيث يصـعب حصـر جمـيع هذه الأنواع. فمن ناحـيـة طول المشوار أو المسـافة الكليـة للحـركة.. توجـد أنواع يكون مـشـوارها مـحـدوداً في بضـعـة سنتـيـمـتـرات وهـي مـا تسـمى بالمحـركـات الـدافـعـة Actuators.. وأنواع يصل مشوارها إلى عدة أمتار - تمثل غـالبيـة المحركات الخطيـة وأنواع يصل مـشـوارها إلـى عـدة كيلومـترات مـثل القطارات. إلا أننا.. يجب أن نفـرق بين قطـارات السكك الحـديديـة التي تعـمل بالمحـركـات الكهـربيـة الدوارة والتي تكون مهـمة محـرك الديزل فـيهـا تشـغيل مـولد كهربي كـبير يغذي المحـرك الكهربي الرئيسي الذي يشـغل القطار وهو ما يحدث في قطارات السـكك الحديدية حاليـاً.. وقطارات المترو التي تديرها أيضاً محـركـات كهربية دوارة يكون المصـدر الكهربي لـهـا هو خط ممتد على طول المسـار. أمـا القطارات التي تعمل بـالمحركات الخطيـة.. فإنهـا ما زالت محـدودة العـدد فـي قليل من بلدان العالم مثل اليابان وألمانيا.

ويلاحظ.. أن جميع أنواع المحركات الكهربية الدوارة مثل مـحركات التيار المستمر وجميع أنـواع محركات التيار المتغير - يوجد لها نظير في المحركات الخطيـة - وجمـيع الأنواع الخطيـة.. يمكن أن تكون بـشـكل مـسـطح أو أنبوبي كما بالشكل رقم (١).

ولأن المحركـات الخطية التـأثيرية هي أكـثـر أنواع المحـركـات الخطيـة شيوعاً.. فـإننا سوف نتناولها بشـيء من التفصيل..

المحركات الخطية التأثيرية Linear Induction Motors

في النـوع التـقـليـدي الدوار من المحركات التـأثيرية.. لو تصورنا أننا قـمنا بقطع كـل من العـضـو الثـابت والعـضو الدائر وتم فـردهما بحـيث يصـبـحـان بشكل مـسطح بدلاً من الشـكل الدائري.. فـــإن هذا الشـكل يكون هو المحرك الخطي التأثيري. أي أن جـزئي المحرك يكون أحدهمـا من رقـائق الـصلب السليكوني بـشكل مـسطح به فـتـحـات المجـاري التي توضع بهـا الملفـات النحـاسيـة التي تغذي من المنبع الكهـربي وتمثل جزء الابتدائي في المحرك - والجزء الثاني يشـبـه الجـزء الأول إلا أن المجـاري يوضع بكل منهـا موصل واحـد ويتم عمل قصر على جميع هذه الموصلات من الجهـتين بما يناظر العـضـو الدائر قفص السنجاب في المحركات الدوارة.

ونظراً لأن المحرك يجب أن يتحرك مسـافة طويلـة.. فإن جزئـي المحرك

Rotating Motor
Flat Linear Motor
Tubular Linear Motor

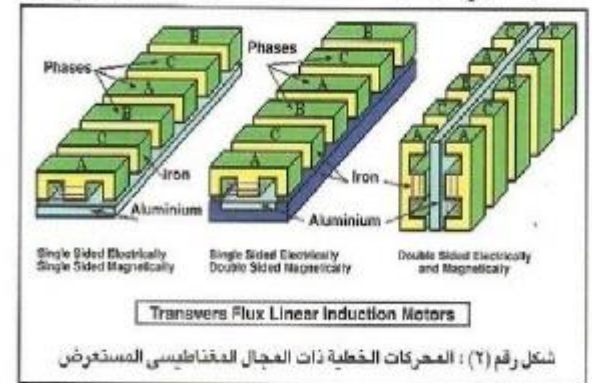
شكل رقم (١): المحركات الدوارة والخطية المسطحة والأنبوبية

يجب أن يكون أحـدهما قـصـيـر وهو الذي يتـحـرك أمـــام الجـزء الثـاني الطويل الـذي يكون ثابتـاً. والجـزء القـصـيـر يمكن أن يكون هو الجـزء الابتـدائي Primary الذي به الملفـات ويكون الجـــزء الطويل هو الثـــانوي Secondary الذي به قفص السنجاب أو العكس.. أي يكون الجزء القـصير هو الثـــانوي والجـــزء الطـويل هو الابتدائي. وعـادة.. إذا كـان الجـزء الطويـل هو الثـــانوي فـــإن قـــفص السنجاب يستبدل بشريحة طويلة من الألومنيـوم.. وفـي هذه الحـالة فـإن الابتدائي يواجه الشـريحة الألومنيوم ويليها جزء حديـدي لاستكمال مسار المجـال المغناطيـسي للمحـافظة عليـه بأكـبـــر عــدد ممكن مـن الخطوط المغناطيـسـيـة.. وبذلك يكون الجـزء الحـديدي مـزدوجـاً في جـهـتي الشـريحـة الألومنيـوم ويسـمى Double Sided Magnetically . وإذا كانت ملفات الابتدائي في جهة واحدة يسمى Single Sided Electrically .. لأنه يمكن تقسيم ملفات الابتدائي إلى نصفين بحيث يوضع نصف في جهة من الألومنيوم والنصف الثـاني في الجهة الثانية ويسمى في هذه الحالة Double Sided Electrically - كـمـا بالشكل رقم (٢).

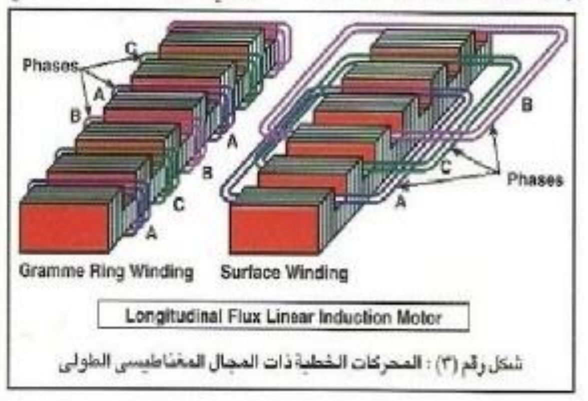
كما أن اتجاه مـسار خطوط المجال المغناطيسي يمكن أن يكون في اتجاه مستعرض بالنسبة لاتجاه الحركة أي Transverse Flux كما بالشكل رقم (٢).. أو يكون فـي الاتجـاه الـطولي لحـركة المحـرك Longitudinal Flux كما بالشكل رقم (٣) والذي يمكن أن توضع فيه ملفات الابتدائي بالنظام الحلقي للثلاثة أوجه Gramme Ring أو بالنظام السطحي Surface. كمـا أن شـرائح الصلب السليكوني يمكن أن تسـتبـدل في أي نوع بشـبـكة حديدية مـصمـتة Composite أكثر سـهولة فـي التصنيع. وهـذا التعـدد الكثـير في أنواع المحـركات الخطيـة التـأثيرية يمكن إجمالهـا في المخطط الموضح بالشكل رقم (٤).

- لماذا يسـتخـدم المحـرك الخطي التأثيري في القطارات الكهربية؟

بالإضـافـة إلى أن استـخـدام أي محـرك كـهـربـي في المركـبـات أو القطارات سوف يؤدي إلى عدم تلوث للبيـئـة بأي أدخنة كـالتي تنتج مع مـحـركـات الديزل.. فــإن المحـرك الكهـربي الخطي يتميز على المحرك الكهـربي الدوار عند استـخـدامـه في



شكل رقم (٢): المحركات الخطية ذات المجال المغناطيسي المستعرض



شكل رقم (٣): المحركات الخطية ذات المجال المغناطيسي الطولي

القطارات في إمكانية الوصول بسهولة إلى سرعة عالية جداً للقطار.

ولأن سرعة القطار تقترب من سرعة الحركة التزامنية (Vs) للمجال المغناطيسي السيار travelling Magnetic Field الناتج من أقطاب الجزء الابتدائي في المحرك - المناظر للمجال الدائري في المحرك الدوار - وتكون السرعة التزامنية للمجال $Vs=2f\tau p$ .. حيث f هي تردد المنبع بالذبذبة في الثانية - τp هي طول الخطوة القطبية بالمتر للجزء الابتدائي من المحرك وعندما يكون تردد المنبع 50 Hz فإن $Vs=100\ \tau p$ (م/ث) أو $Vs = 360\ \tau p$ (كم/س). أي أن سرعة تحرك المجال عندما تكون طول الخطوة القطبية متر واحد سوف تصل إلى إلى ٣٦٠كم /الساعة. ومضاعفة طول الخطوة القطبية تتضاعف سرعة المجال وتكون سرعة القطار قريبة من سرعة المجال العالية جداً هذه.

- طرق تحميل القطار على خط السير:

في القطار الذي يعمل بالمحرك الخطي التأثيري.. يكون الجزء الابتدائي من المحرك الذي يحوي ملفات الثلاثة أوجه موجوداً بالقاطرة المتحركة والتي تتم تغذيتها من المصدر الكهربي خلال خطوط كهربية تماثل الخطوط التي تغذي محركات المترو .. أما الجزء الثانوي من المحرك فيكون عادة عبارة عن شريحة من الألومنيوم بطول خط السير الذي يصل إلى عدة كيلومترات وتمثل تكلفة عالية عند إنشاء الخط. وهذه الشريحة إما أن تكون أفقية كما بالشكل رقم (٥) حيث يوضع أسفلها شريحة حديدية بطول الخط لاستكمال مسار المجال المغناطيسي.. أو تكون رأسية كما بالشكل رقم (٦).. ويكون الجزء الابتدائي من النوع المزدوج.

أما تحميل القطار على خط السير فيتم بواحدة من الطرق الثلاث التالية:

أ- الطريقة الأولى.. باستخدام عجلات مثل قطارات السكة الحديد التقليدية كما في الشكل رقم (٥).

ب- الطريقة الثانية: برفع القطار عن الأرض بواسطة قوة التنافر المغناطيسي Repulsion Type الناتج من مجال ملف مثبت بأسفل القطار كما بالشكل رقم (٦) ويقطع مجال هذا الملف شريحة من الألومنيوم مثبتة على الأرض بطول خط السير لينشأ بها قوة دافعة كهربية وتيار ومجال يحدث قوة تنافر مع مجال الملف ليرفع القطار إلى أعلى مسافة كافية للسير بسهولة. وقوة التنافر هذه.. يجب أن تكون كبيرة بالقدر اللازم لحمل القطار بالكامل بجميع أوزانه وحمولته. ولهذا.. يجب أن يكون تيار الملف عالياً جداً.. مما يدعو إلى تصنيعه من موصلات فائقة التوصيل Superconductors يتم تبريدها إلى أقل من درجة الصفر (كلفن) لتصبح مقاومة الملف المادية (صفر) وبالتالي تكون القدرة المستهلكة بالملف (صفر).. وبذلك لا ترتفع درجة حرارة الملف من أي تيار كهربي يمر به مهما كانت قيمته. وفي الشكل رقم (٦) يستخدم ملفان من هذا النوع أسفل القطار جهتي اليمين واليسار لرفع القطار باتزان.

جـ- الطريقة الثالثة: برفع القطار بواسطة قوة الجذب المغناطيسي Attraction Type لمجال ملف مثبت أسفل القطار يتجاذب مع شريحة من الحديد مثبتة على الأرض بطول خط السير كما بالشكل رقم (٧).. حيث ينشيء الملف مجالاً مغناطيسياً قوياً يمر من خلال القلب الحديدي للملف ويستكمل مساره خلال شريحة الحديد.. فتنشأ قوة الجذب التي تؤدي إلى رفع القطار. والملف هنا أيضاً يصنع من الموصلات فائقة التوصيل حتى تسمح بمرور تيار عال جداً كاف لإنتاج مجال مغناطيسي يقوى على رفع القطار.

Linear Induction Motors
Short Primary | Short Secondary
Moving Primary | Moving Secondary
Sheet Secondary | Composite Secondary
Flat | Tubular
Transverse Flux | Longitudinal Flux | Transverse Flux | Longitudinal Flux
Surface Primary Winding | Gramme Ring Primary Winding | Primary Magnetic Circuit Open | Primary Magnetic Circuit Closed
Double Sided Magnetically-Double Sided Electrically | Double Sided Magnetically-Single Sided Electrically | Single Sided Magnetically-Single Sided Electrically

شكل رقم (٤) : مخطط الأنواع المختلفة للمحركات الخطية التأثيرية

- المشاكل التي تظهر مع المحركات الخطية:

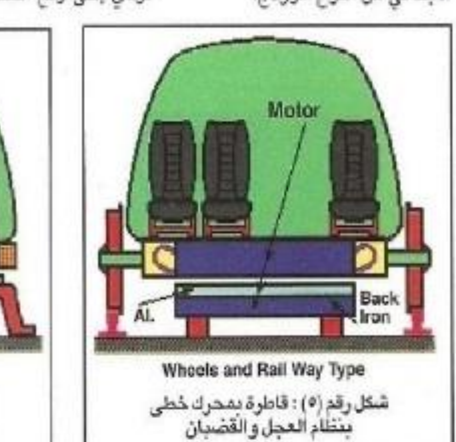
بتحويل المحركات الكهربية بجميع أنواعها من المحركات الدوارة إلى محركات خطية.. تظهر مشاكل لم تكن موجودة في المحركات الدوارة.. من أهمها:

١- تأثيرات البداية والنهاية End Effects:

نتيجة للطول الابتدائي للحدود وعدم اكتمال الدائرة المغناطيسية كما كانت في المحركات الدوارة.. تستنتج تيارات ومجالات مغناطيسية في منطقتي الأمام والخلف للمحرك - نهاية الدخول Entry End ونهاية الخروج Exit End - وهذه المجالات تؤثر بالضرر على المجالات الأساسية للمحرك.

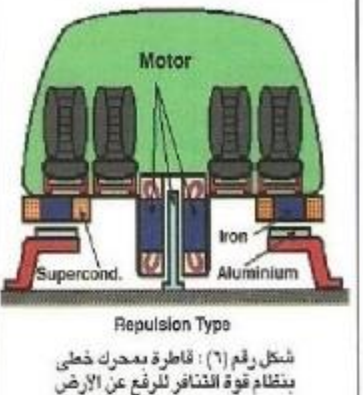
فإذا تصورنا أن المحرك التأثيري الدوار يدور بسرعة التزامن.. فإن العضو الدائر لن تستنتج به قوة دافعة كهربية أو تيار أو مجال لأن سرعة دوران العضو الدائر هي نفس سرعة مجال الابتدائي ولا يقطع الثانوي من مجال الابتدائي.. أما في المحرك الخطي فإنه إذا تحرك بسرعة التزامن - التي تساوي سرعة تحرك المجال المغناطيسي للابتدائي - ويتتبع جزء من شريط الألومنيوم عندما يدخل بالمحرك فإنه يقطع مجال الابتدائي فتستنتج به قوة دافعة كهربية وتيار ومجال مغناطيسي يضاد المجال المغناطيسي للابتدائي فيضعف المجال في منطقة الدخول كما بالشكل رقم (٨).

وبعد منطقة الدخول - أي منطقة



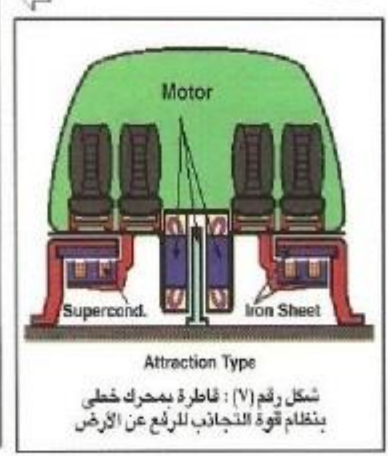
Wheels and Rail Way Type

شكل رقم (٥) : قاطرة بمحرك خطي بنظام العجل والقضبان



Repulsion Type

شكل رقم (٦) : قاطرة بمحرك خطي بنظام قوة التنافر للرفع عن الأرض



Attraction Type

شكل رقم (٧) : قاطرة بمحرك خطي بنظام قوة التجاذب للرفع عن الأرض

الوسط – يصبح مجال الابتدائي متواجداً خلال الثانوي (شريط الألومنيوم).. إلا أنه لا يحدث قطع من مجال الابتدائي لشريط الألومنيوم لتساوي سرعتهما بالنسبة لبعضهما.. فيبقى المجال كما هو دون إضعاف أو زيادة كما بالشكل رقم (٨). وبخروج أي جزء من شريط الألومنيوم من المحرك سوف يتلاشى المجال المغناطيسي الذي كان متعرضاً له.. مما يؤدي إلى قوة دافعة كهربية وتيار ومجال يساعد المجال الأصلي من الابتدائي فيزيده كما بالشكل رقم (٨).

أي أن دخول أي جزء من شريط الألومنيوم داخل المحرك نتيجة لحركة سير القطار يؤدي إلى إنقاص المجال المغناطيسي في منطقة الدخول وزيادته في منطقة الخروج عند أي سرعة سير للقطار.. لأن جزء الشريط سوف يتغير فيه المجال المغناطيسي من الصفر قبل الدخول إلى قيمة المجال بعد الدخول (في منطقة الدخول).. ومن قيمة المجال إلى الصفر بعد الخروج (في منطقة الخروج). وهذه التغيرات في منطقتي الدخول والخروج تتزايد بزيادة سرعة القطار لتزايد سرعة قطع المجال.. وتؤدي إلى المشاكل التالية:

أ- ظهور قوى فرملية تؤدي إلى خفض قوة الجر ونقص كفاءة المحرك ونقص معامل القدرة.

ب- عدم تماثل الدائرة المغناطيسية والمجال المغناطيسي أمام الثلاثة أوجه للفات الابتدائي مما يؤدي إلى عدم تماثل معاملات الأوجه Phase Parameters – وهي مقاومات وممانعات كل وجه – الأمر الذي يؤدي إلى عدم تماثل تيارات الثلاثة أوجه مما ينتج عنه تشويه في شكل توزيع كثافة المجال المغناطيسي عن الشكل الجيبي فيؤدي إلى زيادة مفاقيد الحديد في المحرك ونقص آخر في قوة الجر وكفاءة المحرك ومعامل قدرته.

ولإنقاص تأثيرات الأطراف End Effects يتم عمل الآتي:

- إنقاص عدد الموصلات في المجرى في منطقتي الأطراف.. ويكون ذا تأثير ملحوظ في محركات السرعة المنخفضة وأقل تأثيراً في محركات السرعة العالية.

- زيادة طول الخطوة القطبية Pole Pitch في منطقتي الأطراف عن منطقة الوسط.

- زيادة عدد الأقطاب الكلية للمحرك.

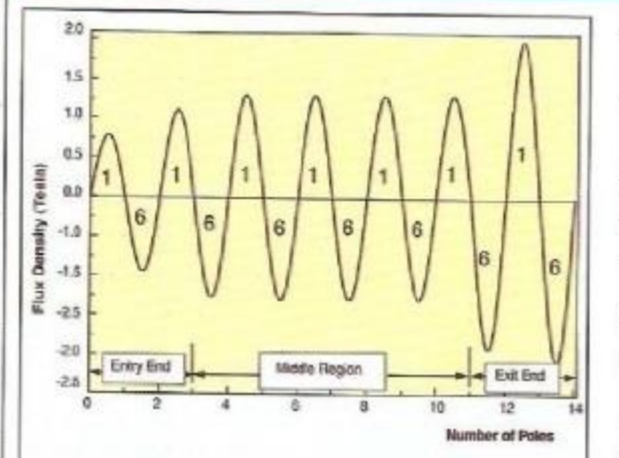
- زيادة المقاومة النوعية للجزء الثانوي من المحرك.

٢- تأثيرات الحواف العرضية Transvers Edge Effects:

في المحركات الدوارة.. يكون طول العضو الدائر مساوياً لطول العضو الثابت.. وإذا تم عمل ذلك في المحرك الخطي بجعل عرض الثانوي وهو شريط الألومنيوم مساو لعرض الابتدائي كما بالشكل رقم (٩).. فإن التيارات تأخذ المسارات الموضحة بالشكل تبعاً لأقطاب الابتدائي.. ونجد أن الأجزاء الفعالة من هذه التيارات والتي تحدث قوة الجر هي الأجزاء الرأسية.. أما الأجزاء الأفقية أو المائلة فإنها لا تحدث قوة جر.

ونظراً لتساوي عرض الثانوي مع عرض الابتدائي.. فإن طول الأجزاء الرأسية للتيارات يكون أقل من عرض الابتدائي لاضطرار التيارات إلى شغل جزء من عرض الثانوي لاستكمال مساراتها تحت بقية الأقطاب.. مما يؤدي إلى نقص الطول الرأسي الفعال لمسارات التيارات وبالتالي نقص قوة الجر.

وللتغلب على هذه المشكلة.. يجب زيادة عرض الثانوي المتمثل في شريط الألومنيوم ليكون دائماً بعرض أكبر من عرض الابتدائي كما بالشكل رقم (١٠) مما يسبب زيادة في



شكل رقم (٨): تأثير الأطراف على تغير المجال في منطقتي الدخول والخروج

تكاليف إنشاء خط السير. ولا يجب زيادة العرض بنسبة كبيرة لأن ذلك يؤدي إلى زيادة مقاومة الثانوي لمرور التيارات مما يسبب زيادة المفاقيد الكهربية ونقص كفاءة المحرك.

– القوى المؤثرة على المحرك:

عند توصيل الابتدائي في المحرك الخطي التأثيري إلى المنبع الثلاثي الأوجه.. تنشأ القوى الأفقية والرأسية التالية:

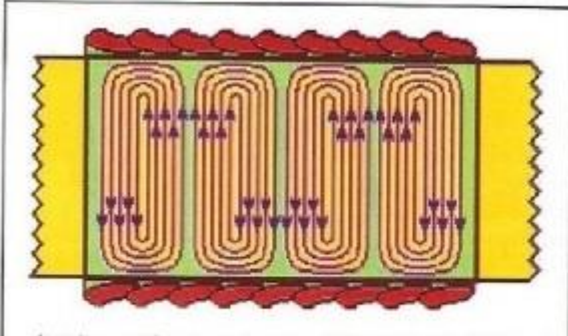
أ- قوة الجر الأفقية Traction Force.. وتسمى أحياناً Propulsion Force وأكثر الأسماء شهرة لقوة الجر هو Thrust.. وتتكون من قوتين متضادتين.. القوة الأمامية الأساسية للجر forward Force والقوة الخلفية Backward Force المضادة لقوة الجر. وهاتان القوتان تناظران العزمين الأمامي والخلفي في المحركات الدوارة.

وإذا كانت تيارات الثلاثة أوجه متماثلة والدائرة المغناطيسية متماثلة وكثافة المجال المغناطيسي بشكل جيبي وقيمة المجال المغناطيسي لجميع الأقطاب واحدة وثابتة.. فإن قوة الجر تكون كلها أمامية ولا توجد قوة خلفية مضادة.. كما كان يحدث بسهولة في المحركات الدوارة من تواجد عزم أمامي فقط دون وجود عزم خلفي. أما في المحركات الخطية وبسبب وجود مشاكل End Effects.. فإن القوة الأفقية سوف تتواجد بها قوة خلفية تتزايد مع زيادة نسبة عدم التماثل في أي من تيارات الثلاثة أوجه أو الدائرة المغناطيسية أو بارامترات الأوجه أو جهود الأوجه. وتكون محصلة القوتين الأفقيتين في الاتجاه الأمامي وتمثل قوة الجر التي تتغير بتغير السرعة أو الانزلاق Slip بشكل يشابه تغير عزم المحرك التأثيري الدوار كما في الشكل رقم (١١).

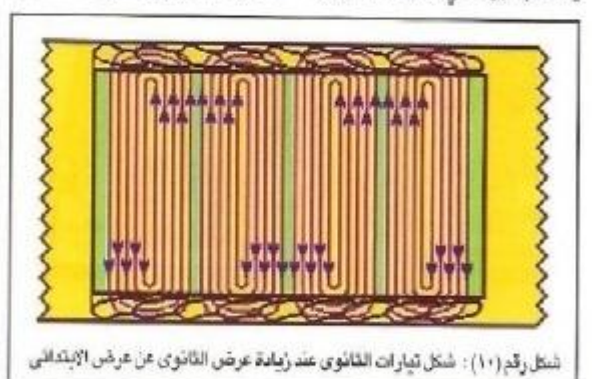
ب- القوى الرأسية Normal Force أو المتعامدة مع القوى الأفقية.. وتتكون من القوى الثلاث الآتية:

١- قوة التنافر بين شريط الألومنيوم وملفات الابتدائي وتسمى Aluminium Repulsion Force ... وهي تنتج من تنافر المجال الناتج من تيار شريط الألومنيوم الثانوي مع المجال الناتج من الابتدائي. وحيث أن تيار الثانوي وبالتالي مجاله يتغير بتغير السرعة ويساوي الصفر عند سرعة التزامن.. فإن قوة التنافر هذه تتغير كما في الشكل رقم (١٢).

٢- قوة التنافر بين الشريحة الحديدية



شكل رقم (٩): شكل تيارات الثانوى عند تساوى عرض الثانوى مع الابتدائى



شكل رقم (١٠): شكل تيارات الثانوى عند زيادة عرض الثانوى عن عرض الابتدائى

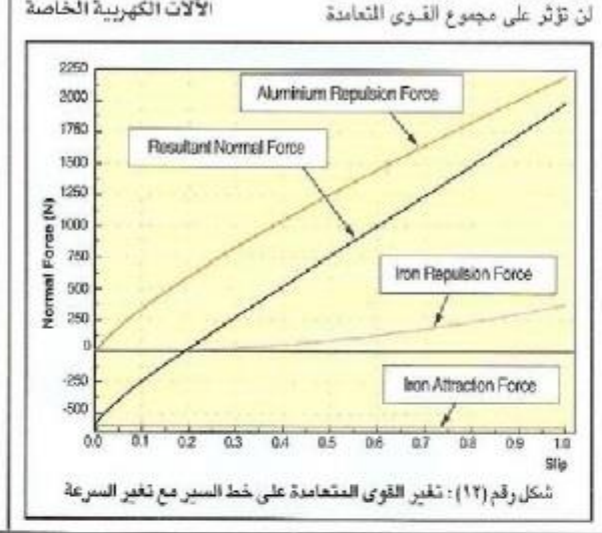
Back Iron الموجودة أسفل شريط الألومنيوم كما بالشكل رقم (٥) وبين ملفات الابتدائي وتسمى Iron Repulsion Force . وتنتج هذه القوة من تنافر المجال الناتج عن تيار الشريحة الحديدية مع مجال ملفات الابتدائي.. ولهذا يجب أن تكون الشريحة الحديدية من الحديد المصمت وليست من رقائق الحديد المعزول حتى يزداد تيارها وتزداد قوة التنافر هذه لأن هذه القوة تساعد في رفع القطار أثناء السير وكذلك في التغلب على قوة الجذب التي تنشأ.

وتتغير قوة التنافر هذه بتغير السرعة أيضاً مثل القوة السابقة كما في الشكل رقم (١٢). وإذا كان المحرك من النوع ذي الابتدائي المزدوج كما في الشكلين (٦)، (٧). فإن قوة التنافر هذه تقل لأن حديد الابتدائي في الجهتين من رقائق الصلب السليكون لتقض مفاقيد الحديد وعدم رفع درجة حرارة الابتدائي أكثر من اللازم.

٢- قوة التجاذب بين الشريحة الحديدية ومجال ملفات الابتدائى وتسمى Iron Attraction Force. وتكون هذه القوة ثابتة مع تغير السرعة كما بالشكل رقم (١٢) عندما يكون تيار الابتدائي ثابتاً. وإذا كان المحرك من النوع ذي الابتدائي المزدوج فإن هذه القوة تكون بين حديد كل جزء ومجال ملف الجزء الآخر إلا أنها لن تؤثر على مجموع القوى المتعامدة زيادة أو نقصاناً.. أي أن القوة الثالثة يكون تأثيرها صفراً عندما يكون الابتدائي من النوع المزدوج. وتكون محصلة القوى الثلاث السابقة كما بالشكل رقم (١٢).. فتكون قوة تنافر عند البدء وفي السرعة المنخفضة، وقوة تجاذب في السرعات العالية القريبة من سرعة التزامن.

في العدد القادم:
الآلات الكهربية الخاصة

شكل رقم (١١) : تغير قوة الجر في المحرك الخطي مع تغير السرعة



شكل رقم (١٢) : تغير القوى المتعامدة على خط السير مع تغير السرعة

لدورانه بأية وسيلة خارجية طالما كان ملف واحد هو الذي يتم تغذيته من المنبع الكهربي.

كما يلاحظ.. أن تغذية ملف واحد في محرك القوى يؤدي إلى احتراق هذا الملف إذا بقي العضو الدائر ساكناً لأن تيار البدء أعلى كثيراً من تيار الدوران كما في الشكل رقم (٣).. أما محرك «السرفو» فإن تيار بدئه يكون صغيراً وقريباً من تيار الدوران. لهذا.. لا توجد أية خطورة على الملف إذا بقي موصلاً بالمنبع سواءً كان المحرك دائراً أم ساكناً. وفي محرك «السرفو» التأثيري.. يسمى هذا الملف الذي يوصل بالمنبع باستمرار بملف المجال لأنه يناظر في أدائه ملف المجال في محركات التيار المستمر حيث يتحمل استمرار توصيله بالمنبع الكهربي سواءً كان المحرك ساكناً أم دائراً.

ولتشغيل محرك «السرفو» التأثيري.. يبقى ملف المجال متصلاً بالمنبع.. وعند الحاجة لدوران المحرك يتم توصيل الملف الثاني - وهو ملف التحكم - بالمنبع الخاص به. ولإيقاف المحرك.. يتم فصل ملف التحكم فقط حتى يعمل المجال الناتج من ملف المجال على فرملة المحرك وتوقفه السريع لكي يصبح سريع الاستجابة للتوقف. أما إذا تم فصل ملف المجال مع ملف التحكم عند الرغبة في إيقاف المحرك.. فإن التوقف يأخذ زمناً طويلاً لفقد العزم الفرملي الذي ينشأ من ملف المجال.

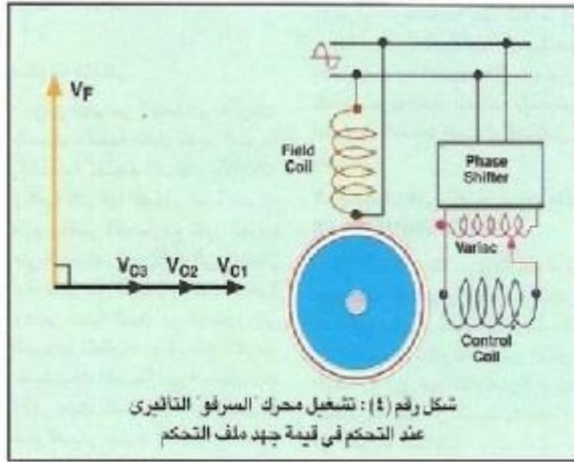
التشغيل والتحكم في محرك «السرفو» التأثيري

ويتم تشغيل محرك «السرفو» التأثيري والتحكم فيه بأي من الطرق الثلاث التالية:

١- التحكم في قيمة جهد ملف التحكم Amplitude Control:

في هذه الطريقة.. يتم توصيل ملف المجال مباشرة وباستمرار إلى منبع تيار متردد ذي وجه واحد كما بالشكل رقم (٤). أما ملف التحكم.. فتستخدم معه وحدة إزاحة Phase Shifter للحصول منها على جهد للتحكم V_C يتأخر أو يتقدم بزاوية زمنية ٩٠° عن جهد ملف المجال V_F ولتغيير قيمة جهد ملف التحكم.. يستخدم مغير لقيمة الجهد مثل Vari-ac. وبذلك.. فإن الجهد V_F إذا كان في الاتجاه الرأسي - كما في الشكل رقم (٤) - يكون ثابت القيمة.. بينما يكون جهد التحكم V_C أفقياً ومتغير القيمة حيث تكون أكبر قيمة له V_{C1} مساوية لجهد المجال V_F.. أما الجهود الأخرى V_{C3} ، V_{C2} فإنها تقل عن V_{C1}.

وحيث أن ملفي المجال والتحكم متعامدان في الفراغ ومتماثلان في عدد اللفات.. فإنه بتوصيلهما إلى الجهدين V_F ، V_{C1} المتساويان في القيمة وبينهما زاوية زمنية ٩٠°.. فإن المجال المغناطيسي الناتج عنهما يكون مجالاً دائرياً ثابت القيمة Circular Rotating Field ينتج عزم دوران أمامي فقط Forward Torque تكون قيمته موجبة عند أية سرعة كما في الشكل رقم (٥).. عندما يكون جهد التحكم V_C يساوي الجهد المقنن V_r. وعندما يقل V_C عن V_r.. فإن المجال المغناطيسي يبقى مجالاً دائراً Rotating ولكنه ليس ثابت القيمة.. بل تتغير قيمته من لحظة إلى أخرى بحيث تدور قيمته على محيط قطع ناقص ويسمى Elliptical Rotating Field. وهذا



شكل رقم (٤): تشغيل محرك "السرفو" التأثيري عند التحكم في قيمة جهد ملف التحكم

المجال المغناطيسي يكافئ مجالين كل منهما Circular Rotating Field أحدهما أمامي والثاني خلفي ومختلفين في القيمة بحيث يكون المجال الخلفي مساوياً للصفر عند $V_C = V_r$.. وكلما نقص V_C تزداد قيمة المجال الخلفي إلى أن يتساوى المجال الخلفي مع المجال الامامي عند $V_C = 0$.

وتكون عزوم المحرك كما بالشكل رقم (٥) عند جهود التحكم المختلفة خلال تغير السرعة من الصفر إلى سرعة التزامن حيث نلاحظ ما يلي:

١- عند $V_C = V_r$.. يكون العزم موجباً عند جميع السرعات.. أي أنه عزم محرك Motoring Torque.

٢- عند $V_C = 0$ يكون العزم سالباً عند جميع السرعات.. أي أنه عزم فرملي Braking Torque.

٣- عندما يكون V_C بين الصفر والجهد المقنن V_r .. يكون العزم موجباً في السرعات المنخفضة وسالباً في السرعات العالية.

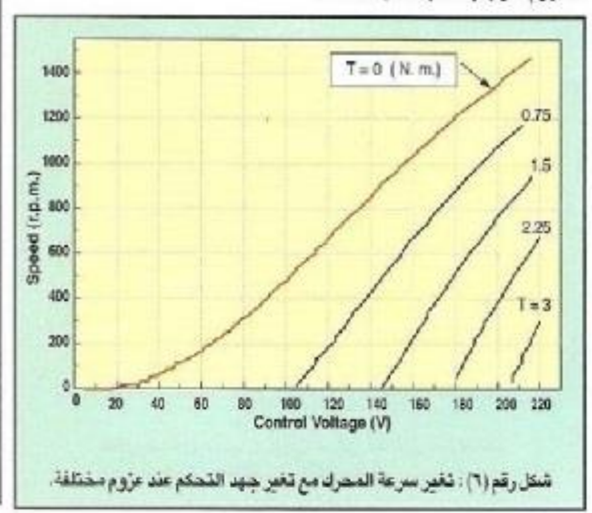
٤- بالنظر إلى شكل مجموعة العزوم الموجبة.. نجد أنها تأخذ شكلاً قريباً من شكل عزوم محرك التيار المستمر «السرفو» عندما يتم التحكم فيه بتغيير جهد عضو الاستنتاج وهي خواص جيدة ومرغوبة.

٥- مجموعة العزوم الموجبة تأخذ شكلاً قريباً من الخطوط المستقيمة.. وهو هدف يجب الوصول إليه في أي محرك «سرفو».

٦- العيب الرئيسي لهذه الخواص.. هو أن ميل هذه المنحنيات ليس ثابتاً.. أي أن معدل تغير العزم بالنسبة للسرعة dT/dN يختلف من جهد تحكم إلى جهد آخر.. وهو ما يظهر من تقاطع منحنى العزم عند نصف جهد التحكم ($V_C = 0.5V_r$) مع محور السرعة عندما يكون العزم مساوياً للصفر. حيث نجد أنه يتقاطع عند سرعة في حدود ٧٠٪ من سرعة التزامن. ولو كان هذا التقاطع عند ٥٠٪ من سرعة التزامن.. لكانت جميع المنحنيات متوازية أي أن ميولها واحدة وهو هدف يبسط



شكل رقم (٥): تغير عزم المحرك مع تغير السرعة عند جهود تحكم مختلفة



شكل رقم (٦): تغير سرعة المحرك مع تغير جهد التحكم عند عزوم مختلفة.

المحرك التأثيري ذو العضو الدائر المصمت

Solid Rotor Induction Motor

د. فتحي عبد القادر

رئيس قسم الهندسة الكهربية وأستاذ الآلات الكهربية - هندسة شبين الكوم

تتناول هذه الدراسة.. عدة أنواع من المحركات الكهربية الخاصة أو ما يسمى بالآلات الخاصة Special Machines.. التي هي تعديل لمحركات تقليدية لإعطاء خواص محددة لكل نوع. وغالباً ما تكون هذه المحركات صغيرة أو متوسطة القدرة.. وهي أكثر أنواع المحركات التي تجري عليها الأبحاث لتطوير تكوينها وتطوير وسائل التحكم فيها. وأول هذه المحركات هو تعديل المحرك التأثيري ثلاثي الأوجه من النوع ذي القفص السنجابي Squirrel Cage ليصبح العضو الدائر كله مجرد قطعة حديد واحدة مصمتة Solid Rotor كما بالشكل رقم (١).

ويتم تعديل هذا المحرك المعروف بتميزه على معظم المحركات.. بهدف الحصول على الميزات التالية:

١- تبسيط مكونات العضو الدائر بدلاً من استخدام رقائق الصلب السليكوني وتفتيح مجار بها ورصها بحيث تأخذ زاوية ميل محددة.. ثم صب الألومنيوم في المجاري وتشكيل الحلقات الطرفية End Rings في العضو الدائر لقفص السنجاب.. حيث تستخدم قطعة من الصلب الطري Mild Steel بنفس الأبعاد الخارجية للجزء الحديدي من العضو الدائر القفص السنجابي.

٢- ضمان عمر أطول للعضو الدائر المصمت دون حاجة للصيانة.. حيث يحتاج العضو الدائر للقفص السنجابي إلى الصيانة عندما يحدث قطع في الحلقات الطرفية أو في موصلات المجاري نتيجة لتيارات القصر العالية عند حدوث أخطاء أو عند تكرار عمليات بدء الدوران بمعدلات عالية.

٣- زيادة مدى تغير السرعة مع اتزان المحرك.. حتى يمكن استخدام وسيلة بسيطة للتحكم في السرعة عن طريق تغيير جهد العضو الثابت حيث يمكن تغيير السرعة من الصفر وحتى قرب سرعة التزامن.

٤- الاستغناء عن وسيلة بدء الدوران لنقص التيارات عندالسرعات المختلفة.

٥- تحمل تكرار بدء الدوران لأي عدد من المرات في الساعة.

٦- توزيع أفضل لكثافة المجال المغناطيسي على محيط العضو الدائر بحيث تكون جيبية Sinusoidal.. وبدون توافقيات مجاري العضو الدائر Rotor Slot Harmonics التي كانت تحدث مع قفص السنجاب.. وبالتالي تتلاشى مشاكل هذه التوافقيات من زيادة المفاقيد ونقص العزوم وزيادة الضوضاء.

٧- نقص مستوى الضوضاء Noise بنسبة كبيرة عن محرك القفص السنجابي.

٨- معامل قدرة أفضل من محرك القفص السنجابي وطول المدى الكبير لتغير السرعة.

نظرية التشغيل

تعتبر نظرية تشغيل هذا المحرك.. هي نفس نظرية تشغيل المحرك التأثيري التقليدي ذي العضو الدائر ذي القفص السنجابي.. إلا أن التيارات الأساسية في العضو الدائر كانت تمر في الموصلات والحلقات الطرفية الألومنيوم في القفص السنجابي.. أما في العضو الدائر المصمت فإن تيارات العضو الدائر تمر في الجسم الحديدي المصمت ذاته في مسارات أكثر تنظيماً وتوزيعاً في خطوط موازية لمجاري العضو الثابت.. وتستكمل مساراتها في الطرفين أيضاً خلال حديد العضو الدائر المصمت. ولهذا.. فإن العضو الدائر في هذا المحرك لا يجب أن يكون من رقائق الصلب المعزول لأن تيارات العضو الدائر سوف تكون صغيرة جداً بدرجة لا تعطي أي مجال كاف من العضو الدائر لإيجاد عزم من المحرك.

اختلاف الخصائص

يرجع اختلاف الخصائص بين محركي القفص السنجابي والعضو الدائر المصمت إلى الأسباب التالية:

١- تواجه التيارات مقاومة مادية مكافئة Equivalent Rotor Resistance ذات قيمة أعلى بكثير من المقاومة المادية المكافئة العضو الدائر ذي القفص السنجابي.. تمر في حديد العضو الدائر المصمت.

٢- تتغير قيمة المقاومة المكافئة للعضو الدائر ذي القفص السنجابي مع تغير السرعة.. نتيجة لظاهرة التأثير السطحي Skin Effect في موصلات العضو الدائر الألومنيوم التي يكون مقطعها هو شكل مجري العضوى الدائر.. حيث تكون المقاومة عند بدء الدوران عالية لمرور التيار في الجزء الخارجي من الموصلات جهة سطح العضو الدائر حيث تكون مساحة الموصلات التي يمر بها التيار صغيرة وبالتالي تكون مقاومة العضو الدائر كبيرة. ومع زيادة السرعة.. يقل التأثير السطحي لنقص تردد العضو الدائر مما يجعل التيارات تمر في مساحة أكبر من الموصلات الألومنيوم وبالتالي تنقص المقاومة المكافئة للعضو الدائر كلما زادت سرعة المحرك. وهذا التغير في مقاومة القفص السنجابي يحسن من خواص هذا المحرك ليقربه من خواص المحرك ذي العضو الدائر الملفوف Wound Rotor بحيث تتزايد عزوم للمحرك ذي القفص السنجابي طوال فترة تزايد السرعة خلال بدء الدوران.

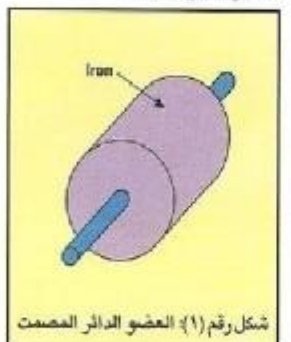
أما العضو الدائر المصمت.. فإن مقاومته الكافئة تأخذ شكلاً مختلفاً في القيمة والتغير.. لأن مسارات التيارات في العضو الدائر المصمت تعتمد على مسارات خطوط المجال المغناطيسي فيه. وتختلف مسارات المجال.. مع تغير سرعة العضو الدائر. فعند سكون المحرك خلال لحظة بدء الدوران.. تكون خطوط المجال المغناطيسي بالشكل التقليدي الموضح في الشكل رقم (٢) للمحرك المكون من قطبين. وهذا الشكل لخطوط المجال.. يؤدي إلى تيارات منتظمة الشكل في اتجاه محور الدوران المتعامد على اتجاه خطوط المجال المغناطيسي.. وتختلف كثافة هذه التيارات قيمة واتجاهاً من نقطة إلى أخرى على محيط العضو الدائر.. إلا أنها تكون شبه ثابتة خلال خط نصف قطر عن سطح العضو الدائر إلى المركز. وهذا الشكل يجعل طول مسارات التيار كبيراً عند بدء الدوران.. وبالتالي تكون المقاومة المكافئة للعضو الدائر عالية.

ومع دوران العضو الدائر.. فإن خطوط المجال المغناطيسي تأخذ الأشكال المقوسة الموضحة في الشكل رقم (٢) والتي تؤدي إلى زيادة كثافة المجال المغناطيسي قرب سطح العضو الدائر وتناقصه نحو الداخل.. وبالتالي يقل طول مسارات التيارات مما يؤدي إلى نقص المقاومة المكافئة للعضو الدائر المصمت مع زيادة سرعة الدوران.

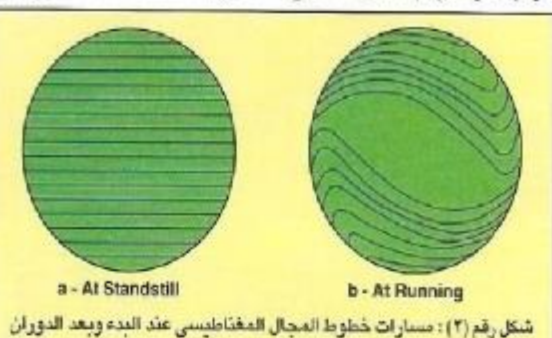
وعلى هذا.. فإننا نجد أن المقاومة المكافئة للعضو الدائر تتغير مع تغير السرعة أو الانزلاق Slip كما في الشكل رقم (٣).. حيث زادت مقاومة العضو الدائر المصمت لزيادة المقاومة النوعية Resistivity للحديد عن المقاومة النوعية للألومنيوم المستخدم في القفص السنجابي.. وتكون المقاومات بالنسب الموضحة في الشكل رقم (٣).

٣- الاختلاف الكبير في قيم ومعدل تغير ممانعة الهروب للعضو الدائر Rotor Leakage Reactance.. رغم ثبات ممانعة الهروب للعضو الدائر ذي القفص السنجابي عند قيمة صغيرة كما بالشكل رقم (٤).. لأن ممانعة الهروب لا تكاد تتأثر بظاهرة Skin Effect الناتجة في القفص السنجابي.

إلا أنه بسبب انتظام خطوط المجال المغناطيسي وتوزيعه المبين في الشكل رقم (٢) عند بدء الدوران للعضو الدائر المصمت.. فإن المجال الأساسي الممغنط Magnetising Flux يزداد.. وبالتالي يكون المجال الهارب صغيراً. ومن ثم.. فإن ممانعة هروب العضو الدائر المصمت عند السكون تكون



شكل رقم (١): العضو الدائر المصمت



شكل رقم (٢): مسارات خطوط المجال المغناطيسي عند البدء وبعد الدوران



شكل رقم (٣) : تغير مقاومات العضو الدائر مع تغير السرعة

شكل رقم (٤) تغير ممانعات هروب العضو الدائر مع تغير السرعة

صغيرة جداً كما بالشكل رقم (٤).

ومع زيادة سرعة العضو الدائر وتقوس خطوط المجال الممغنط وتراصه قرب السطح الخارجي للعضو الدائر –شكل رقم (٢)– تحدث زيادة للمجال الهارب وبالتالي زيادة ممانعة هروب العضو الدائر المصمت بنسبة كبيرة مع زيادة السرعة كما بالشكل رقم (٤).

طرق التطوير

نظراً لزيادة المقاومة المكافئة للعضو الدائر المصمت بنسبة كبيرة عن القفص السنجابي.. فإن عزوم المحرك تنخفض خصوصاً في السرعات العالية. ويتم تطوير المحرك ذي العضو الدائر المصمت لزيادة هذه العزوم بالطرق التالية:

١– إضافة قشرة خارجية من النحاس على سطح العضو الدائر وتصنع هذه القشرة بطريقة التشكيل الكهربي Coating لتكون رقيقة وشديدة الالتصاق بالسطح الخارجي للعضو الدائر.. مما يؤدي إلى نقص المقاومة المكافئة للعضو الدائر عند جميع السرعات وبالتالي تتحسن خواص الأداء للمحرك.

٢– صب حلقة نحاسية في كل من طرفي العضو الدائر كما بالشكل رقم (٥).. لتمر من خلالهما تيارات العضو الدائر في الأطراف مثل الحلقات الطرفية End Rings في القفص السنجابي مما يؤدى أيضاً إلى مزيد من نقص المقاومة المكافئة للعضو الدائر وبالتالي تحسن أكثر لخواص الأداء للمحرك ذي العضو الدائر المصمت.

٣– جعل الجزء الداخلي للعضو الدائر – حول محور الدوران – من النحاس بشكل اسطوانة داخلية كما بالشكل رقم(٦).. مما يؤدي إلى المزيد من نقص المقاومة المكافئة للعضو الدائر. كما تؤدي هذه الاسطوانة النحاسية الداخلية إلى نقص في ممانعة هروب العضو الدائر.. مما يؤدي إلى المزيد من التحسن في خواص المحرك. ويطلق على هذا النوع أحياناً اسم الجلبة أو Sleeve Rotor.

٤– عمل مجاري في السطح الخارجي للعضو الدائر في اتجاه محور الدوران كما بالشكل رقم (٧) ويسمى بالعضو الدائر المشقق Slitted Rotor وذلك بطريقة مشابهة لمجاري العضو الدائر ذي القفص السنجابي.. إلا أنها تكون ذات عرض وعمق أقل. أما عدد هذه المجاري.. فيماثل عدد مجاري العضو الدائر ذي القفص السنجابي وبنفس شروطه حتى لا تظهر مشاكل توافقيات منحنى العزم مع السرعة وما يتبعها من مشاكل نقص العزوم والتأرجح والقلقلة حول سرعة معينة خلال فترة بدء الدوران. وعادة ما توضع في هذه المجاري موصلات من النحاس أو من الالومنيوم على شكل شرائح Strips.. يتم توصيلها مع بعضها من الطرفين خلال الحلقات الطرفية End Rings لتشكل قفص سنجاب رقيق، ولا يجب أن نقول هنا أن العضو الدائر عاد كما كان عضواً دائراً ذي قفص سنجابي.. لانه في القفص السنجابي التقليدي تمر كل تيارات العضو الدائر تقريباً في القفص ذاته ولا يمر برقائق حديد العضو الدائر أية تيارات. أما في العضو الدائر المصمت من هذا النوع Slitted Rotor.. فإن جزءًا من تيارات العضو الدائر يمر بالقفص السنجابي وجزءًا آخر ذا قيمة عالية يمر بحديد العضو الدائر المصمت.. مما يجعل كلاً من المقاومة المكافئة وممانعة الهروب للعضو الدائر بقيم مناسبة لإعطاء عزوم عالية خلال تغير السرعة لمدى كبير مع تيارات مناسبة في كل من العضو الدائر والعضو الثابت يتحملها المحرك بسهولة. وما زالت الأبحاث مستمرة لتطوير هذا المحرك للوصول إلى أية خاصية محددة تكون مطلوبة.

خواص الأداء

يتم حساب خواص الأداء لهذا المحرك من الدائرة المكافئة له والتي تشبه الدائرة المكافئة للمحرك ذي القفص السنجابي. وللتبسيط.. يمكن تثبيت قيم مقاومات وممانعات الدائرة المكافئة مع تغير السرعة في المحرك ذي القفص السنجابي.. أما في محرك العضو الدائر المصمت فيجب أن تكون قيمة المقاومة المكافئة وممانعة الهروب للعضو الدائر متغيرة مع تغير السرعة كما بالشكلين رقمي (٣)، (٤).

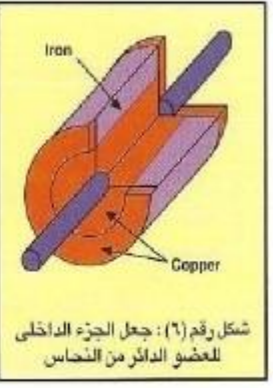
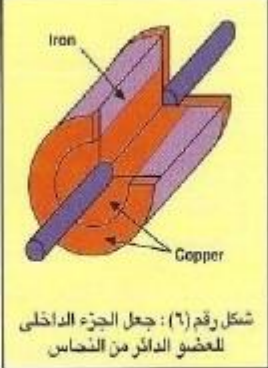
ونظراً لأن هذا المحرك يعتبر تعديلاً للمحرك ذي العضو الدائر ذي القفص السنجابي.. فسوف نوضح خواص الاعداد لثلاثة أنواع من المحركات لكي تتضح الفروق بينها.. وقد أخذت مقاومات وممانعات هروب العضو الدائر متغيرة مع السرعة كما بالشكلين رقمي (٣، ٤).

أ– المحرك ذو القفص السنجابي Squirel Cage Motor:

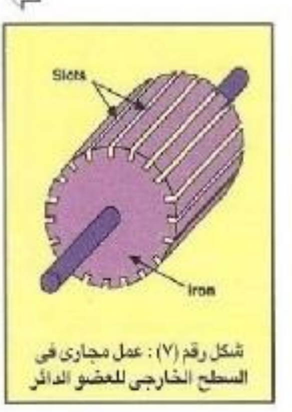
يوضح الشكل رقم (٨) تغير عزم المحرك مع تغير السرعة منذ السكون عند بدء الدوران.. وحتى الوصول إلى سرعة التزامن. ونلاحظ.. أن المحرك ذي القفص السنجابي إذا تم زيادة الحمل عليه بعد أن يتم تشغيله.. فإن سرعته تنخفض من حوالي ١٥٠٠ إلى حوالي ١٤٠٠ لفة/دقيقة عند الحمل الكامل.. وإذا تم زيادة عزم الحمل عليه أكثر من ذلك فإن تياراته ومفاقيده تزداد ولا يتحملها المحرك. ولا يجب أن يبقى المحرك ذي القفص السنجابي عاملاً مع الحمل خلال مدى السرعة من صفر حتى حوالي ١٤٠٠لفة/دقيقة.. وتسمى هذه المنطقة من السرعات بمنطقة عدم الاتزان Unstable Region. أما المنطقة من ١٤٠٠ – ١٥٠٠ لفة/دقيقة فتسمى بمنطقة الاتزان Stable Region. وأهم عيوب هذه الخواص أن المحرك ذي القفص السنجابي لا يمكن تغيير سرعته خلال كل منطقة عدم الاتزان باستخدام الطرق البسيطة لتغيير السرعة عن طريق تغيير الجهد المسلط على العضو الثابت للمحرك.. وهذه المنطقة من السرعات منطقة عريضة تصل إلى ٩٢٪ من سرعة المحرك عند اللاحمل.

ب– المحرك ذو العضو الدائر المصمت التقليدي Conventiial Solid Rotor:

شكل رقم (٥) إضافة حلقتين نحاسيتين إلى العضو الدائر المصمت

شكل رقم (٦) : جعل الجزء الداخلى للعضو الدائر من النحاس



شكل رقم (٧) : عمل مجارى فى السطح الخارجى للعضو الدائر



شكل رقم (٨) تغير عزوم المحرك مع تغير السرعة

شكل رقم (٩) : تغير تيارات المحرك مع تغير السرعة

بعد دوران المحرك عند اللاحمل، تكون سرعة هذا المحرك عالية، قرب سرعة التزامن (١٥٠٠ لفة/دقيقة)، وبزيادة عزم الحمل، تنخفض السرعة تدريجياً. ويمكن تحميل المحرك بعزم أكبر من عزم الحمل الكامل للمحرك ذي القفص السنجابي، لأن التيارات سوف تكون منخفضة كما يظهر من الشكل رقم (٩). والمهم في هذه الخواص، أن منطقة الاتزان أصبحت عريضة وأصبح المحرك قابلاً لأن يعمل مع الحمل عند أية سرعة ابتداءً من الصفر حتى قرب سرعة التزامن (١٥٠٠ لفة/دقيقة) ولا توجد منطقة عدم اتزان. وأصبح من السهل التحكم في السرعة بأبسط طرق تغيير الجهد المسلط على العضو الثابت.

جـ- المحرك ذو العضو الدائر المصمت المطور Developed Solid Rotor:

وفي هذا المحرك أمكن زيادة عزوم المحرك والوصول إلى عزوم بدء عالية كثيراً عن المحركين السابقين، مع الاحتفاظ بخاصية الاتزان خلال كل السرعات كما في الشكل رقم (٨).

ويوضح الشكل رقم (٩).. تغير تيارات المحركات الثلاثة مع تغير السرعة. ونلاحظ.. أن محرك القفص السنجابي يأخذ تيارات عالية بنسبة كبيرة عن المحركين الآخرين. والأهم.. أنه برغم زيادة عزوم المحرك ذي العضو الدائر المصمت المطور عن المحركين الآخرين خلال منطقة واسعة من السرعات المنخفضة.. فإن تياراته تكون أقل من تيارات المحرك ذي القفص السنجابي وذلك لما تسببه مقاومة وممانعة هروب العضو الدائر المصمت المطور من تحسين – أي زيادة – في الزاوية بين مجال العضو الثابت والعضو الدائر. ويكون المحرك في العضو الدائر المصمت التقليدي أقل المحركات تياراً عند أية سرعة لزيادة كل من مقاومته وممانعة هروبه.

ويوضح الشكل رقم (١٠).. تغير قدرة خرج المحركات الثلاثة مع تغير السرعة.. حيث أن أكبر قدرة خرج يمكن الحصول عليها من محرك القفص السنجابي.. أي أن قدرة العمل الكامل تكون ١٥٠٠ وات عند ١٤٠٠لفة/دقيقة. وبرغم انخفاض قدرة الخرج لمحركي العضو الدائر المصمت التقليدي والمطور عن خرج المحرك ذي القفص السنجابي بسبب صغر السرعات التي يعمل عندها المحرك.. إلا أنه يمكن الحصول على قدرة خرج مناسبة طوال مدى كبير لتغير السرعة.

ويوضح الشكل رقم (١١) تغير قدرة دخل المحركات الثلاثة مع تغير السرعة.. حيث تكون قدرة دخل المحرك ذي العضو الدائر المصمت المطور بأعلى القيم خصوصاً عند بدء الدوران.. بسبب مقاومة عضوه الدائر التي تزيد من معامل قدرته. ومع زيادة السرعة تنخفض قدرة الدخل كما بالشكل.

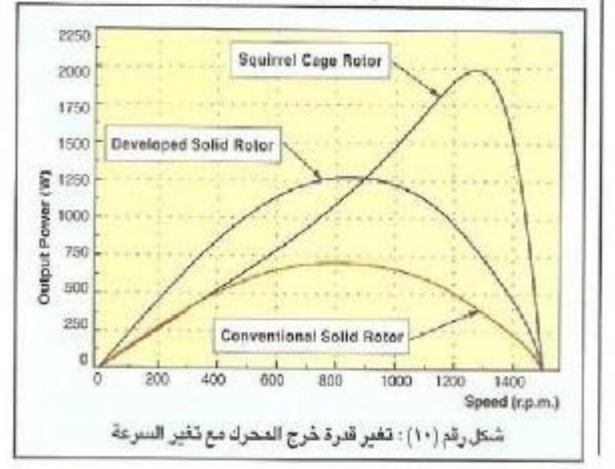
أما الشكل رقم (١٢).. فإنه يعطي خواصاً هامة للمحركات الثلاثة.. لأنه يبين تغير الكفاءة مع السرعة لكل محرك. ونلاحظ من هذا الشكل.. أن المحرك ذي القفص السنجابي تكون كفاءته (صفر) عند اللاحمل عند سرعة ١٥٠٠ لفة/دقيقة.. ومع زيادة عزم الحمل تتزايد كفاءته حتى تصل إلى أقصى كفاءة في حدود ٨٥٪ ثم تنقص قليلاً عندالحمل الكامل عند سرعة ١٤٠٠ لفة/ دقيقة. وباقي المنحنى من السرعة ١٤٠٠ إلى السرعة (صفر) لا يعمل المحرك فيها باتزان مع الحمل. أما المحرك ذو العضو الدائر المصمت التقليدي.. فإن كفاءته تقل عن المحرك ذي القفص السنجابي.. وتقل بنسب أكبر في السرعات المنخفضة.. وهو ما يعتبر من أبرز عيوب هذا المحرك والذي ما زالت الأبحاث تجري لتطويره ونجد أن الكفاءة قد تحسنت مع المحرك ذي العضو الدائر المصمت المطور.. إلا أنها ما زالت منخفضة في السرعات المنخفضة كما بالشكل.

ويوضح الشكل رقم (١٣) تغير معامل قدرة المحركات الثلاثة مع تغير السرعة. ونجد أن معامل القدرة للمحرك ذي القفص السنجابي يتزايد من أصغر قيمة عند اللاحمل وحتى أكبر قيمة عندالحمل الكامل عند سرعة ١٤٠٠لفة/دقيقة.. بينما في المحركين الآخرين يتزايد معامل القدرة من نفس القيمة عند اللاحمل ويستمر في التزايد مع انخفاض السرعة.. ويبقى معامل القدرة مرتفعاً طوال مدى كبير من السرعات المنخفضة ويكون أعلى في المحرك ذي العضو الدائر المصمت المطور عنه في النوع التقليدي كما بالشكل.

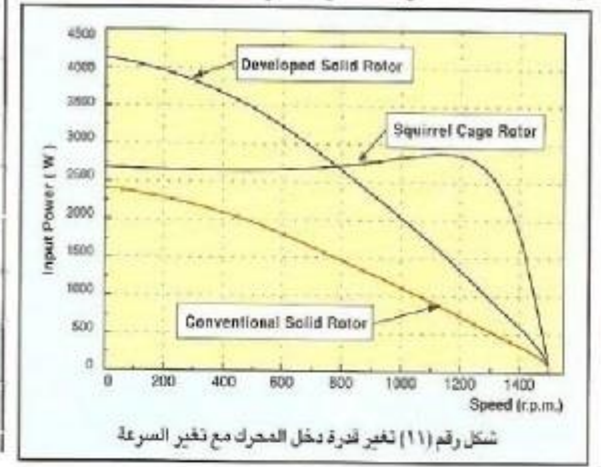
ونلاحظ.. أن معامل القدرة العالي هنا خلال مدى واسع من السرعة قد يجعل المحرك ذي العضو الدائر المصمت في غير حاجة إلى مكثفات لتحسين معامل القدرة كما يحدث مع المحرك ذي القفص السنجابي.. مما يعتبر من مميزات المحرك ذي العضو الدائر المصمت.

الاستخدامات

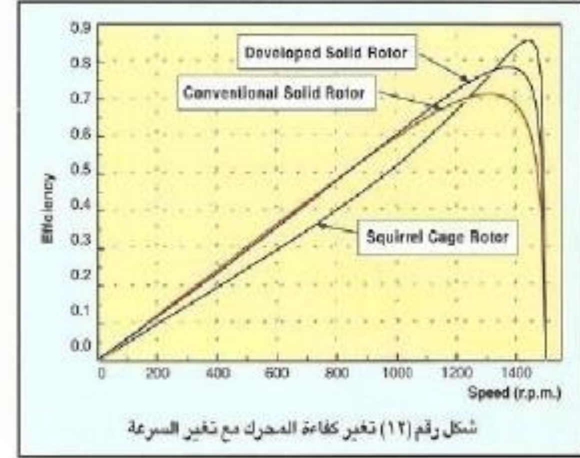
تستخدم هذه المحركات للأحمال التي تحتاج إلى عزم بدء عال للعمل



شكل رقم (١٠) : تغير قدرة خرج المحرك مع تغير السرعة



شكل رقم (١١) تغير قدرة دخل المحرك مع تغير السرعة



شكل رقم (١٢) تغير كفاءة المحرك مع تغير السرعة

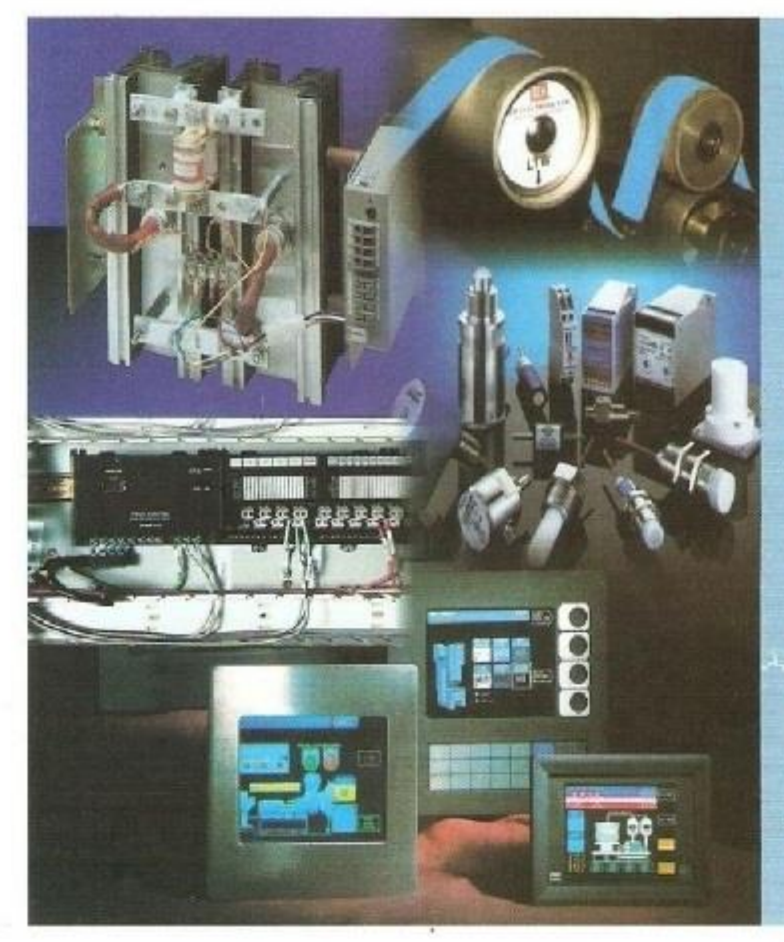
شكل رقم (١٣) : تغير معامل قدرة المحرك مع تغير السرعة

عند السرعات المنخفضة بعزوم عالية.. كما تحتاج لتغيير السرعة خلال مدى كبير. ومن أمثلة هذه الأحمال.. أحمال الجر الكهربي Traction بأنواعه المختلفة.. والأحمال ذات العزم الثابت مع تغيير السرعة مثل الروافع والأوناش.. وسيور نقل الأحمال والسلالم المتحركة..

كما يستخدم المحرك ذو العضو الدائر المصمت وهو في حالة فرملة Braking Operation عندما يغذي العضو الثابت بالتيار المستمر ليعطي عزماً فرملياً عالياً خلال مدى كبير من تغير السرعة أفضل كثيراً من القفص السنجابي الذي ينتج عزماً فرملياً عالياً قرب سرعة الصفر فقط وليس خلال مدى كبير من السرعة كما في العضو الدائر المصمت. وتستخدم عملية الفرملة هذه في كثير من الأغراض سواءً كان المحرك يعمل كمحرك ثم يراد فرملته بذاته دون الاستعانة بأية فرملة إضافية.. أو يستخدم كفرملة في بعض الأغراض ومنها عمليات التحميل الاصطناعية للمحركات عند اختبارها (أجهزة الدينامومیتر Dunamome-ter). كما.. يستخدم العضو الدائر المصمت عندما يعمل بنظام الفرملة للربط الكهروميكانيكي بين محرك كهربي سرعته ثابتة وحمل يحتاج لسرعة متغيرة يتم الحصول عليها عند تغيير قيمة التيار المستمر الذي يغذي به العضو الثابت. وفي هذه الحالة.. يكون كل من العضوين الثابت والدائر قابلين للحركة الدورانية.. حيث يتم ربط العضو الثابت ميكانيكياً مع عامود دوران الحمل.. ويتم ربط عامود دوران العضو الدائر ميكانيكياً مع عامود دوران المحرك ذي السرعة الثابتة. وتسمى هذه الطريقة بالربط بالتيارات الإعصارية Eddy Current Coupling.. نسبة إلى التيارات الإعصارية التي هي تيارات العضو الدائر المصمت.. حيث يتم هذا الربط بين المحرك الرئيسي ثابت السرعة والحمل بوسيلة ربط (محرك العضو الدائر المصمت) تسمح بتغيير سرعة الحمل برغم ثبات سرعة المحرك الرئيسي.

في العدد القادم:

محرك الممانعة المغناطيسية



محرك الممانعة المغناطيسية التزامني

Synchronous Reluctance Motor

د. فتحي عبد القادر
رئيس قسم الهندسة الكهربية وأستاذ الآلات الكهربية - هندسة شبين الكوم

يعتبر هذا المحرك تعديلاً للمحرك التزامني التقليدي من النوع ذي الأقطاب البارزة Salient Poles بهدف الحصول على المزايا التالية:

١- الاستغناء عن ملفات الأقطاب وبالتالي توفير تكلفتها عند التصنيع.

٢- توفير الطاقة الكهربية التي كانت تستهلك في ملفات الأقطاب.. مما يؤدى إلى الوفر في تكاليف التشغيل المستمرة Running Cost.

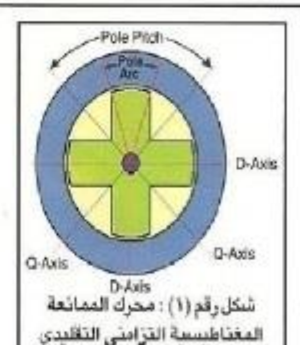
٣- الاستغناء عن منظومة تغذية ملفات الأقطاب وما يلزمها من حلقات انزلاق وفرش كربونية تحتاج للصيانة المستمرة.. ويصبح المحرك من النوع الخالي من الفرش Brushless.

٤- الاستغناء عن ملفات المجال.. حتى يتيح الفراغ الذي كان لازماً لها إمكانية وضع قفص سنجابي Squirrel Cage أفضل يعطي عزم بدء دوران وعزم اضمحلال Damping Torque عاليين.

ويماثل العضو الثابت Stator لهذا المحرك.. العضو الثابت للمحرك التزامني أو المحرك التأثيري.. أما العضو الدوار للمحرك Rotor فإنه - في النوع التقليدي - يكون عبارة عن أسطوانة من الحديد المصمت يتم قطع أجزاء منها لتشكيل ما يشبه الأقطاب البارزة كما في الشكل رقم (١).

نظرية عمل المحرك

يتم تغذية العضو الثابت من مصدر ثلاثي الأوجه لينشأ مجال مغناطيسي دائري Rotating Field تقوم أقطابه بجذب الأجزاء البارزة للعضو الدوار لتدور بنفس سرعة المجال الدوار التزامنية الثابتة بثبات تردد المصدر. ولهذا.. يكون هذا المحرك من النوع



شكل رقم (١) : محرك الممانعة المغناطيسية التزامني التقليدي

التزامني Synchronous الذي تتحدد سرعته التزامنية Ns من العلاقة (Ns = 60 f/p) حيث.. f تردد المصدر و p عدد أزواج الأقطاب.

ويلاحظ.. أن عدد الأجزاء البارزة من العضو الدوار مساو لعدد الأقطاب التي ينتجها العضو الثابت وهي أربعة - شكل رقم (١). وعندما يكون المحرك دائراً بدون حمل.. فإن محور الجزء البارز من العضو الدوار يكون واقعاً في منتصف مجال قطب العضو الثابت.. أي أن محور العضو الدوار منطبق على محور قطب العضو الثابت. ويسمى محور العضو الدوار بالمحور المباشر Direct Axis أو D-Axis.. أما المحور المتعامد عليه والذي يقع عند أكبر طول للثغرة الهوائية بين العضو الثابت والعضو الدوار - فيسمى بالمحور المتعامد Quadrature Axis (Q-Axis). والتعامد هنا هو زاوية ٩٠ درجة كهربية التي تساوي ٤٥ درجة ميكانيكية للمحرك ذي الأربعة أقطاب.

ومع تحميل المحرك بأي حمل ميكانيكي.. يتأخر محور العضو الدوار عن محور قطب العضو الثابت بزاوية في الفراغ تسمى بزاوية الحمل



المعادلات

$T = 1.5\,(V^2/\omega_s).(1/X_q - 1/X_d).\,\text{Sin}\,2\,\delta$ .... (1)

حيث ..V: جهد المحرك للوجه - ($\omega_s = 2\,\pi\,Ns/60$) - X_d إجمالي ممانعة العضو الثابت للوجه عندما تكون زاوية الحمل مساوية للصفر - X_q: إجمالي ممانعة العضو الثابت للوجه عندما تكون زاوية الحمل ٩٠ درجة كهربية. وتسمى (X_d / X_q) بنسبة البروز Saliency Ratio.

$C_d = a + (1-a)\,[(\beta + (\text{Sin}\,\beta\pi)/\pi]$ .... (2)

$C_q = a + (1-a)\,[\beta - (\text{Sin}\,\beta\pi)\pi]$ .... (3)

حيث.. C_d : معامل المحور المباشر - C_q : معامل المحور المتعامد - a : نسبة أقل طول إلى أكبر طول للثغرة ($a = g_1/ g_2$)

$X_d = C_d\,X_o + X_l$ .... (4)

$X_q = C_q X_o + X_l$ .... (5)

حيث.. X_o: ممانعة المغنطة Magnetising Reactance للعضو الثابت للوجه إذا كان العضو الدوار على شكل أسطوانة دائرية بدون أي قطع فيها - X_l: ممانعة الهروب للوجه للعضو الثابت.

Load Angle والتي تتزايد بتزايد عزم الحمل إلى أن يصل العزم إلى أقصاه Pull Out أو Maximum Torque Torque حيث تصل زاوية الحمل إلى ٤٥ درجة كهربية. ويخرج المحرك عن التزامن وتصل سرعته إلى الصفر إذا تجاوز عزم الحمل هذه القيمة. ويلاحظ.. أن زاوية أقصى حمل كانت ٩٠ درجة كهربية في المحرك التزامني التقليدي.. لأن العزم كان (صفراً) عند زاوية حمل (صفر).. وكذلك عند زاوية حمل ١٨٠ درجة كهربية. أما في محرك الممانعة المغناطيسية.. فإن العزم يكون (صفراً) عند زاوية حمل (صفر).. ولكن بسبب تشابه الأجزاء البارزة في العضو الدوار وبدون أي قطبية شمالية أو جنوبية.. فإن العزم يكون (صفراً) مرة ثانية عند زاوية حمل ٩٠ درجة كهربية.. لأنه لن تحدث قوة جذب بين مجال العضو الثابت والأجزاء البارزة من العضو الدوار.

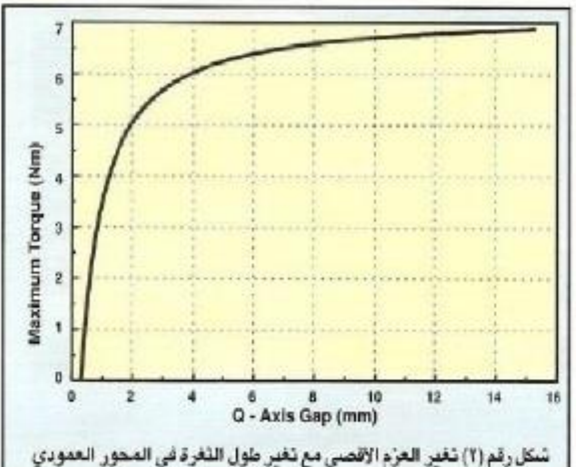
ويتم حساب عزم الدوران T لهذا المحرك من المعادلة رقم (١)..

تأثير شكل العضو الدوار على خواص المحرك

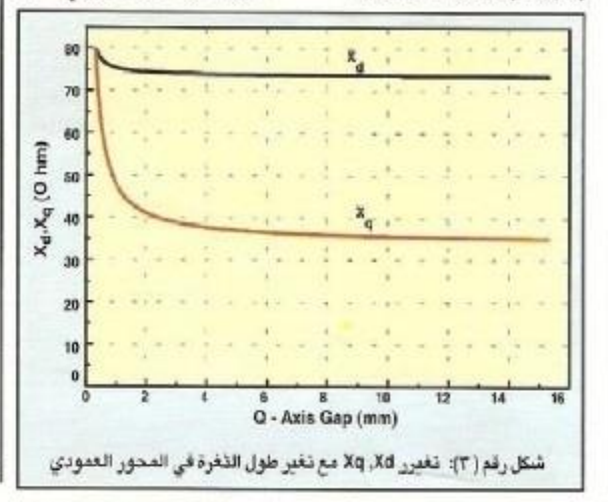
يؤثر شكل العضو الدوار على قيمة كل من Xd، Xq واللتان تؤثران بدورهما على باقي خواص المحرك. والعاملان الرئيسيان في تحديد شكل العضو الدوار هما.. عمق الجزء المقطوع من العضو الدوار والذي يؤثر على قيمة طول الثغرة الهوائية g2 في المحور المتعامد Q-Axis.. والمعامل β وهو نسبة عرض الجزء البارز من العضو الدوار Pole Arc إلى عرض الخطوة القطبية Pole Pitch أي أن β = Pole Arc/ Pole Pitch. ويتلخص تأثير هذين العاملين في:

١- تأثير طول الثغرة الهوائية g_2:

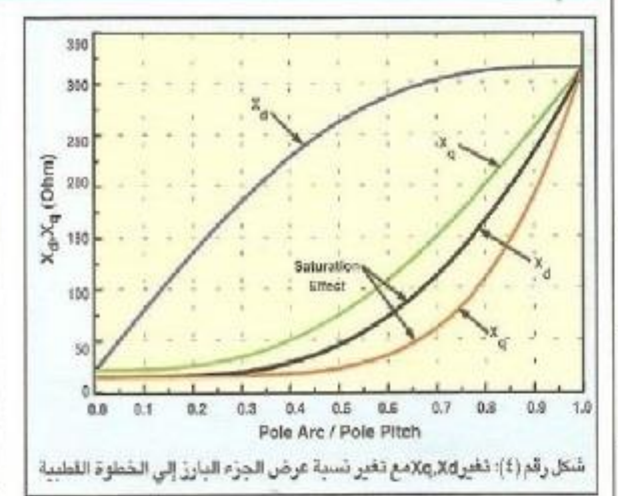
تكون الثغرة الهوائية g_1 في المحور



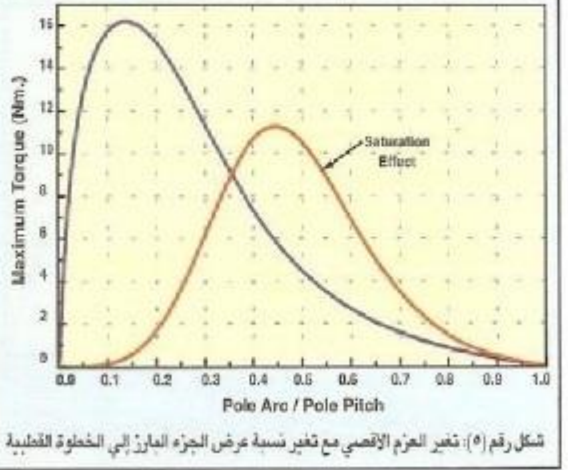
شكل رقم (٢) تغير العزم الأقصى مع تغير طول الثغرة في المحور العمودي



شكل رقم (٣): تغيرر Xd، Xq مع تغير طول الثغرة في المحور العمودي



شكل رقم (٤): تغير Xq,Xd مع تغير نسبة عرض الجزء البارز إلى الخطوة القطبية



شكل رقم (٥): تغير العزم الأقصى مع تغير نسبة عرض الجزء البارز إلى الخطوة القطبية

المباشر D-Axis بأقل قيمة ممكنة بحيث تسمح فقط بدوران العضو الدوار دون احتكاك بالعضو الثابت حتى يمكن زيادة X_d.. وبالتالي يزداد عزم المحرك وينخفض التيار وتتحسن خواص المحرك.

أما الثغرة الهوائية g_2 في المحور المتعامد.. فيتم حساب تأثيرها من المعادلات أرقام (٢)، (٣)، (٤)، (٥).

وبأخذ قيمة $\beta = 0.6$، $g_1 = 0.3$ mm وحساب تأثير تغير g_2 على قيمة العزم الأقصى للمحرك.. أي عند $\delta = 45$.. ومن المعادلات السابقة.. نحصل على الشكل رقم (٢) الذي يتزايد فيه العزم الأقصى مع زيادة g_2 بمعدل كبير في البداية ثم يتناقص معدل الزيادة بحيث يمكن الاكتفاء بقيمة في حدود ١٥ مم في هذا المثال لطول الثغرة g_2 الذي هو Q-Axis Gap. وتتغير قيمة كل من X_d ، X_q كما بالشكل رقم (٣).

٢- تأثير عرض الجزء البارز من العضو الدوار:

لبيان هذا التأثير - تغير β - يجب حساب بقية خواص الأداء كما يلي:

- بعد حساب كل من X_d ، X_q والعزم الأقصى بأخذ $g_1 = 0.3$ mm، $g_2 = 15$ mm ووضع $\delta = 45$ في المعادلات من (١) إلى (٥).. يتم حساب قدرة خرج المحرك P_{out} من العلاقة $P_{out} = T\omega_s$.

- يتم حساب تيار المحور المباشر I_d من العلاقة $I_d = (V/X_d) \cos\delta$.. وكذلك تيار المحور العمودي I_q من العلاقة $I_q = (V/X_q) \sin\delta$. ويتم حساب التيار الكلي للوجه في العضو الثابت I من العلاقة $I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$..

- كما يتم حساب مفاقيد حديد العضو الثابت P_i من العلاقة $P_i = 3V^2/R_m$ حيث R_m هي المقاومة المكافئة لمفاقيد حديد العضو الثابت للوجه.

ويتم حساب مفاقيد نحاس العضو الثابت P_c من العلاقة $P_c = 3I^2 r_1$.. حيث r_1 هي مقاومة ملفات الوجه في العضو الثابت.

- كما يتم حساب قدرة الدخل للمحرك P_{in} من العلاقة:

$$P_{in} = P_{out} + P_i + P_c$$

- أما الكفاءة.. فيتم حسابها من العلاقة: $\eta = P_{out} / P_{in}$. كما يتم حساب معامل القدرة pf من المعادلة:

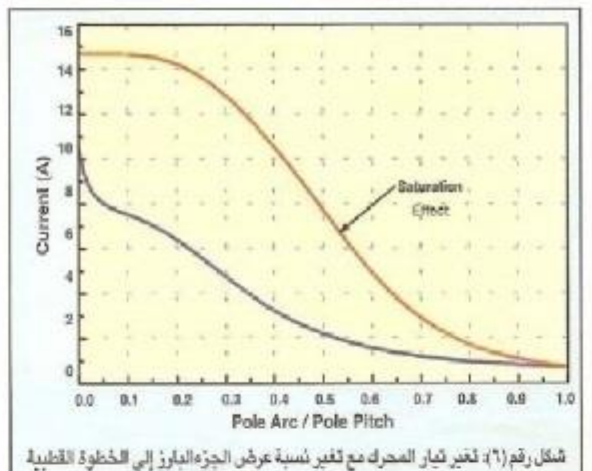
$$pf = P_{in} / (3VI)$$

ومن هذه الحسابات نحصل على خواص الأداء للمحرك عند قيم مختلفة للنسبة β.

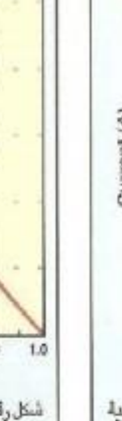
يبين الشكل رقم (٤) تغير كل من X_d ، X_q مع تغير النسبة β. وعندما تساوي β الواحد الصحيح فإن هذا يعني أن العضو الدوار اسطواني بدون قطع أي جزء منه وتكون X_d مساوية X_q وبأعلى قيمة لأن مجال العضو الثابت يكون بأكبر قيمة له لنقص المعاوقة المغناطيسية. وبنقص قيمة β تنقص كل من X_d ، X_q كما بالشكل.. إلا أن X_q تكون أقل من X_d وهو ما يسبب نشأة عزم الممانعة المغناطيسية التزامني Synchronous Reluctance Torque.

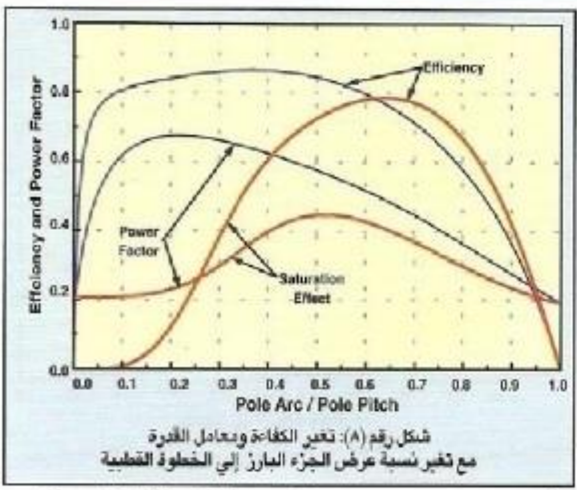
ويلاحظ.. أنه بنقص قيمة β (نقص عرض الجزء البارز) فإن خطوط المجال المغناطيسي الناتجة من العضو الثابت تتركز في هذا الجزء البارز مما يؤدي إلى نقص عدد هذه الخطوط لسببين. الأول هو أن نقص β يؤدي إلى زيادة مساحة المنطقة بين الجزئين البارزين مما يزيد من المجال الهارب leakage Flux وبالتالي ينقص المجال الذي يمر خلال العضو الدوار Magnetising Flux مما يؤدي إلى نقص X_d.. أما السبب الثاني فهو زيادة تشبع حديد الجزء البارز من العضو الدوار كلما نقصت قيمة β مما يؤدي إلى نقص قيمة كل من X_d، X_q عن قيمتهما بإهمال تأثير التشبع كما بالشكل رقم (٤).

أما العزم الأقصى للمحرك.. فإنه يتغير بتغير β كما بالشكل رقم (٥).. حيث يصل العزم الأقصى إلى الصفر عندما تكون β مساوية للصفر أو الواحد الصحيح لتساوي كل من X_q ، X_d عند هاتين القيمتين. ويتزايد العزم الأقصى بين $\beta = 0$ ، $\beta = 1$.. وتحدث أقصى قيمة له عند $\beta = 0.13$ بإهمال تأثير التشبع المغناطيسي. وبأخذ تأثير التشبع في الاعتبار.. فإن أقصى قيمة للعزم الأقصى تنقص من 16.2 Nm إلى 11.2 Nm لهذا المحرك.. وتحدث عند $\beta = 0.45$. ورغم ذلك.. فإن الشكل رقم (٥) لا يعتبر كافياً لاختيار أفضل قيمة لعرض الجزء البارز بالنسبة لخطوة القطب β عند قيمة $\beta = 0.45$ مثلاً.. لأن تغير تيار دخل المحرك مع تغير β المبين في الشكل رقم (٦) له دخل كبير في اختيار β.. حيث نجد أن التيار يتزايد



شكل رقم (٦): تغير تيار المحرك مع تغير نسبة عرض الجزء البارز إلى الخطوة القطبية


شكل رقم (٧): تغير العزم للأمبير مع تغير نسبة عرض الجزء البارز إلى الخطوة القطبية



شكل رقم (٨): تغير الكفاءة ومعامل القدرة
مع تغير نسبة عرض الجزء البارز إلي الخطوة القطبية

شكل رقم (٩) : تغير قدرتا الدخل والخرج
مع تغير نسبة عرض الجزء البارز إلي الخطوة القطبية

بمعدلات مختلفة كلما نقصت ß.

ولهذا.. فإن الشكل الأفضل لاختيار أفضل قيمة ß يتحدد بأخذ تغير كل من العزم والتيار في الاعتبار.. وذلك من نسبة العزم إلى التيار Torque / Ampere الموضح في الشكل رقم (٧).. حيث تحدث أعلى قيمة بأخذ التشبع في الاعتبار عند ß = 0.55 – وإذا أخذت ß=0.6 فإن العزم لكل أمبير لا ينقص كثيراً عن حاله ß = 0.55. في حين ينقص التيار بنسبة جيدة مما يحسن كفاءة المحرك. ويحافظ أيضاً على قيمة عالية لمعامل القدرة كما هو موضح بالشكل رقم (٨).

وإذا لم يحدث تشبع مغناطيسي للحديد.. ينخفض تيار المحرك وتتزايد عزومه وتكون أفضل قيمة للنسبة ß هي 0.25 – شكل رقم (٧). إلا أن تحقيق ذلك.. يتطلب زيادة حجم العضو الدوار وبالتالي حجم العضو الثابت مما يؤدي إلى زيادة التكاليف بنسبة لا تعادل الزيادة في عزوم المحرك أو نقص تياره. وتتغير قدرة دخل وخرج المحرك مع تغير ß كما بالشكل رقم (٩).. حيث يؤدي التشبع إلى نقص هذه القدرات.

خواص الأداء للمحرك

مع تغير عزم الحمل علي المحرك.. تتغير خواص أدائه – الأشكال أرقام من (١٠) إلى (١٤).

يبين الشكل رقم (١٠) تغير زاوية الحمل مع تغير العزم.. حيث تتزايد الزاوية بمعدل شبه خطي مع العزوم الصغيرة ثم تتزايد بمعدل كبير قرب العزم الاقصى الذي يحدث عند زاوية ٤٥. أما تغير تيار المحرك مع تغير العزم – شكل رقم (١١) – فيبدأ بقيمة عالية عند اللاحمل مثل المحركات التأثيرية.. بينما يمكن التحكم في تيار اللاحمل في المحركات التزامنية التقليدية بضبط قيمة تيار مجال الأقطاب بحيث يمكن أن يصل تيار المحرك إلى قرب الصفر عند اللاحمل. ويعتبر هذا التيار العالي عند اللاحمل في محركات الممانعة المغناطيسية أحد عيوب هذا النوع من المحركات. ولإنقاص هذا التيار.. يجب إنقاص طول الثغرة الهوائية في المحور المباشر بقدر الإمكان. ومع تزايد عزم الحمل.. يتزايد التيار بمعدل منخفض كما بالشكل.

ومن الخواص الهامة التي شاع استخدامها حديثاً.. نسبة العزم إلى



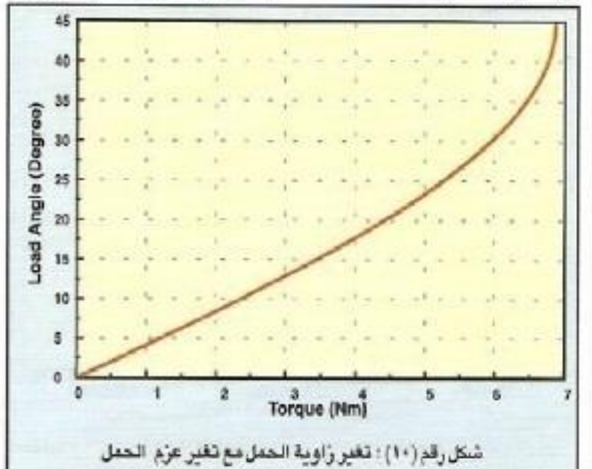
التيار Torque/Ampere.. حيث يجب زيادتها بقدر الإمكان لأنها تعني نقص التيار الذي يعطي نفس العزم والذي يؤدي إلى نقص مفاقيد المحرك وتحسين كفاءته. وباستخدام منظومات التحكم الالكترونية الحديثة.. يمكن زيادة هذه النسبة بتوجيه المجال المغناطيسي. ويبين الشكل رقم (١٢) تغير هذه النسبة مع تغير عزم الحمل علي المحرك بدون أي عمليات تحكم لتحسينها.. حيث تتزايد مع زيادة العزم وتصل إلى أقصى قيمة عند عزم أقل قليلاً من العزم الاقصى. ويجب أن يكون عزم الحمل الكامل للمحرك عند أقصى نسبة للعزم/الأمبير. وهذه النسبة.. حتى القيمة العظمى منها.. تعتبر صغيرة في هذا المحرك بالشكل التقليدي للعضو الدوار بسبب الاستغناء عن ملفات مجال العضو الدوار مما يحتم زيادة نسبة العزم/الأمبير بتحسين شكل العضو الدوار وكذلك بتوجيه المجال المغناطيسي للعضو الثابت.. بحيث تكون زاوية الحمل بمقدار ٤٥ درجة كهربية عند أي قيمة لعزم الحمل.

ويبين الشكل رقم (١٣) تغير كل من قدرة دخل وخرج المحرك مع تغير عزم الحمل.. حيث تصل قدرة خرج هذا المحرك إلى حوالي ١,٥ حصان. وتكون كفاءة هذا المحرك مناسبة لأنها في حدود ٨٠٪ عند الحمل الكامل – شكل رقم (١٤) وذلك بسبب ملاشاة مفاقيد العضو الدوار. أما معامل القدرة لهذا المحرك فيكون منخفضاً كما بالشكل حيث تقل أقصى قيمة له عن ٠,٤٥ وهي قيمة منخفضة حتى عن قيمة معامل القدرة في المحركات التأثيرية لنفس القدرة من المحركات. لهذا.. يعتبر معامل القدرة المنخفض لمحركات الممانعة المغناطيسية أحد عيوبها الرئيسية.

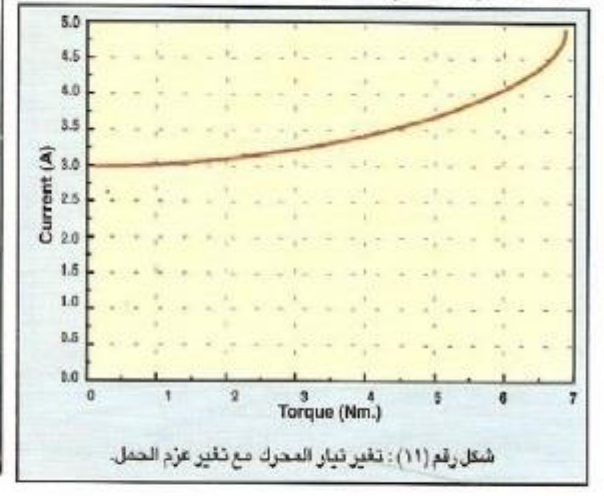
تحسين خواص المحرك

يعطي الشكل التقليدي المبسط للعضو الدوار الموضح في الشكل رقم (١) أداءً متواضعاً للمحرك يستدعي التطوير لتحقيق الأهداف التالية:

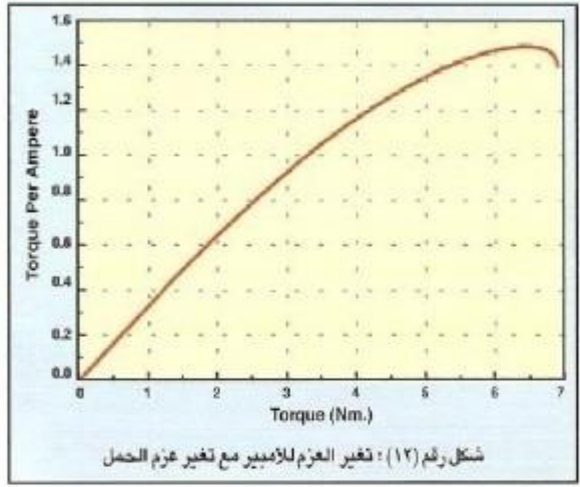
١– زيادة X_d وخفض X_q حتى تزداد النسبة بينهما (X_d/X_q) وبالتالي يزداد العزم الأقصى وقدرة خرج المحرك: ويتم زيادة X_d بإنقاص القاومة المغناطيسية Reluctance في المحور المباشر D-Axis بزيادة مساحة الحديد الذي تمر به خطوط المجال المغناطيسي في هذا المحور وكذلك إنقاص طول الثغرة الهوائية بين العضو الدوار والعضو الثابت بقدر الإمكان. أما



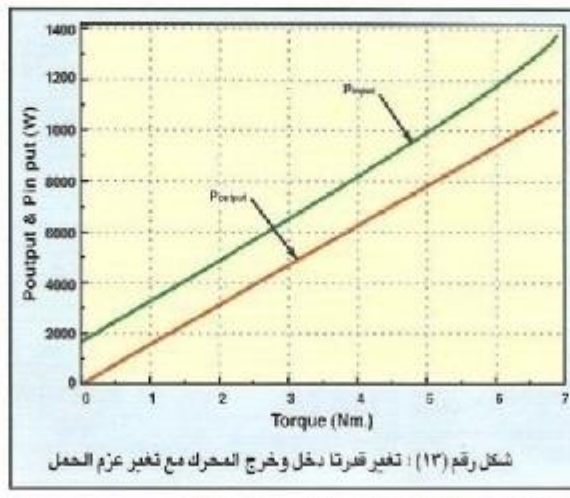
شكل رقم (١٠) : تغير زاوية الحمل مع تغير عزم الحمل



شكل رقم (١١) : تغير تيار المحرك مع تغير عزم الحمل.



شكل رقم (١٢) : تغير العزم للأمبير مع تغير عزم الحمل



شكل رقم (١٣) : تغير قدرتا دخل وخرج المحرك مع تغير عزم الحمل

إنقاص X_q.. فيتم بزيادة طول الثغرة الهوائية خلال المحور العمودي Q-Axis لإنقاص عدد خطوط المجال المغناطيسي التي يمكن أن تمر خلال هذا المحور.. كما يتم- خلال هذا المحور - قطع أجزاء داخلية أو عمل عوارض أو حواجز للمجال Flux Barrier فيه.

٢- إنقاص تيار المحرك خصوصاً عند اللاحمل: ويتم ذلك بتصنيع العضو الدوار من رقائق الصلب السليكوني ذي النفاذية Permeability المغناطيسية العالية عن الحديد المصمت.. الأمر الذي يؤدي أيضاً إلى إنقاص التيار عند جميع الاحمال.. وبالتالي تحسين معامل القدرة وزيادة نسبة العزم إلى الأمبير.

٣- زيادة العزوم التاثيرية Induction Torques اللازمة لبدء دوران المحرك: ويتم ذلك لأن عزم الممانعة المغناطيسية Reluctance Torque المحسوب من المعادلة رقم (١) ينتج فقط عندما يدور المحرك بسرعة التزامن. أما في السرعات الأقل خلال فترة البدء.. فيجب أن يعطي المحرك عزماً تاثيرياً كافياً خصوصاً إذا كان يبدأ دورانه بالحمل وليس بدون حمل. ويتواجد هذا العزم التاثيري بشكل يشبه عزم المحرك التأثيري بعمل قفص Cage يشبه القفص السنجابي في المحرك التأثيري. وكلما كان هذا القفص موزعاً على المحيط الخارجي للعضو الدوار بشكل منتظم وبأكبر مساحة ممكنة.. كانت عزوم البدء عالية.

ولتحقيق هذه الأهداف.. يتم تصنيع العضو الدوار لمحرك الممانعة المغناطيسية بالأشكال التالية:

أ- العضو الدوار المجزأ Segmental Rotor:

وهو مكون كما بالشكل رقم (١٥) من ٤ قطع من الحديد المصمت.. يفضل أن تكون من رقائق الصلب السليكوني بعدد مساو دائماً لعدد أقطاب العضو الثابت.. وتوضع بحيث يكون بينها مسافة في المحور المباشر تملأ بالألومنيوم الذي ينقص المجال المغناطيسي للمحور العمودي وبالتالي ينقص X_q.. في الوقت الذي يعمل فيه هذا الألومنيوم مع الألومنيوم الداخلي الموجود حول محور الدوران كقفص ينتج العزم التاثيري.. ويكون الجزء المقطوع من السطح الخارجي لكل قطعة Cut-out ضرورياً لزيادة طول الثغرة الهوائية في المحور العمودي ويمكن ملؤه بالألومنيوم لزيادة تأثير القفص والعزم التأثيري.

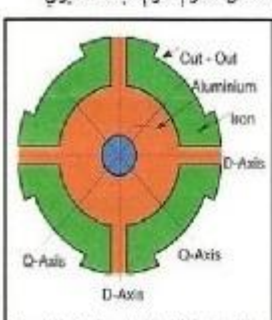
شكل رقم (١٤) : تغير الكفاءة ومعامل القدرة مع تغير عزم الحمل

ب- العضو الدوار ذو الرقائق المحورية Axially Laminated Rotor:

ويتكون كما بالشكل رقم (١٦) في المحرك ذي الأربعة أقطاب من ٤ مجموعات من رقائق الصلب السليكوني كل منها يتم تشكيلها بحيث توضع موازية لمحور الدوران وبحيث يمر المجال المغناطيسي لأقطاب العضو الثابت خلال المحور المباشر D-Axis.. حيث يمر مجال قطب العضو الثابت إلى العضو الدوار خلال المحور المباشر ثم إلى المحور المباشر المجاور ثم إلى قطب العضو الثابت المجاور. وتكون المعاوقة المغناطيسية خلال هذا المسار بأقل قيمة حتى تزداد X_d بقدر الإمكان.. بينما توضع فواصل من مواد غير مغناطيسية بين كل مجموعتين. ويمكن وضع عدة فواصل داخل كل مجموعة لزيادة المعاوقة المغناطيسية في طريق المجال المغناطيسي الذي يحاول المرور خلال المحور العمودي Q-Axis حتى تكون X_q بأقل قيمة ممكنة لزيادة العزم. ويتم صب الومنيوم في الأجزاء الخارجية بشكل قفص مشتملاً على الحلقتين الطرفيتين End Rings لينتج عزم البدء التاثيري.

جـ- العضو الدوار ذو عوارض المجال Rotor with Flux Barriers.

يتكون هذا العضو الدوار كما بالشكل رقم (١٧).. من رقائق الصلب السليكوني بشكل يقارب شكل العضو الدوار للمحرك التاثيري.. إلا أن تفتيح المجاري Slots لا يكون بشكل مجار متماثلة ومنتظمة التوزيع كالمحرك التاثيري.. ولكن جزءًا من هذه المجاري يشكل عوارض للمجال المغناطيسي في المحور العمودي تكون عميقة لزيادة المعاوقة في المحور العمودي وبالتالي إنقاص X_q. ويترك جزء في المحور العمودي قرب محور الدوران بدون تفتيح وذلك للتماسك الميكانيكي بين أجزاء كل شريحة من الصلب السليكوني. وتشكل بقية المجاري ٤ مجموعات من المجاري المغلقة على السطح الخارجي بحيث يترك بين كل مجموعة منها جزء خال من المجاري في المحور المباشر يسمح بزيادة مجال المحور المباشر وبالتالي زيادة X_d لزيادة عزم المحرك. ويتم حقن الألومنيوم المنصهر في جميع المجاري لتشكيل القفص اللازم لعزم البدء التاثيري.



شكل رقم (١٥) : العضو الدائر المجزأ



شكل رقم (١٦): العضو الدائر ذو الرقائق المحورية

شكل رقم (١٧) : العضو الدائر ذو عوارض المجال

محرك الممانعة المغناطيسية الانتقالي

Switched Reluctance Motor

د. فتحي عبد القادر

رئيس قسم الهندسة الكهربية وأستاذ الآلات الكهربية - هندسة شبين الكوم

يعتبر هذا المحرك تعديلاً لمحرك الممانعة المغناطيسية التزامني Synchronous Reluctance Motor.. للحصول على المميزات التالية:

١- إيجاد عزم بدء دوران دون الحاجة إلى القفص السنجابي Squirrel Cage المستخدم في محرك الممانعة المغناطيسية التزامني.

٢- إمكانية الدوران بزاوية محددة ثم التوقف.. مما يتيح استخدامه في منظومات التحكم الموضعي Position Control التي يكون الهدف منها تحريك الحمل الميكانيكي بزاوية معينة.. أو نقل الحمل مسافة محددة كما في منظومات «الروبوت».

٣- الحصول على عزم بدء دوران بقيمة عالية يناظر عزم بدء محرك التوالي Series Motor.

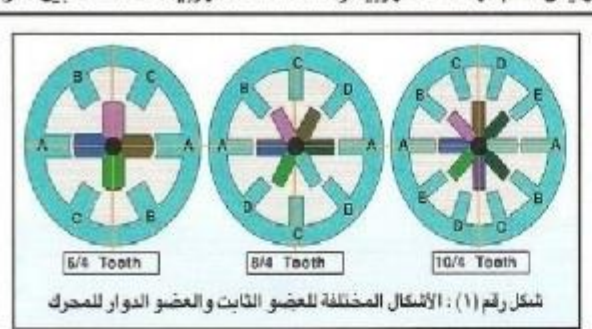
٤- إمكانية الحصول على سرعات عالية جداً مثل محرك التوالي.

٥- إطالة العمر الافتراضي للمحرك أكثر من محرك التوالي.. وتقليل الحاجة إلى الصيانة.. حيث أنه لا يحتوي على عضو توحيد Commutator أو فرش Brushes.

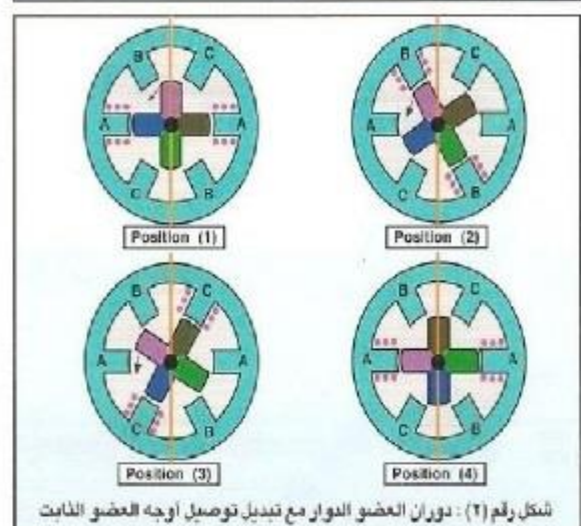
مكونات المحرك

يتكون المحرك من عضو دوار على شكل أقطاب بارزة أو أسنان Teeth من الحديد المصمت أو رقائق الصلب السليكوني.. ولا يوضع على هذه الأقطاب أي ملفات. والعضو الثابت.. يتكون من عدد آخر من الأقطاب البارزة أو الأسنان من رقائق الصلب السليكوني.. ويوضع على كل قطب ملف.. ويسمي كل قطبين متقابلين وجه Phase. ويجب أن يكون عدد أسنان العضو الثابت مختلفاً عن عدد أسنان العضو الدوار حتي يتم دوران المحرك.

وأكثر المحركات شهرة من هذا النوع.. ذلك الذي يتكون فيه العضو الثابت من ستة أسنان أي ثلاثة أوجه وعدد أسنان العضو الدوار من أربعة أسنان.. ويسمى بالمحرك ٦/٤ سنة - شكل رقم (١). ويصنع المحرك أيضاً بعدد ٨/٦ سنة أو ١٠/٨ سنة كما بالشكل.. ولهذه الأسنان أعداد وأشكال أخرى. ويؤدي الاختلاف بين هذه الأنواع إلى اختلاف قيمة زاوية التحرك للعضو الدوار لكل نبضة كهربية Pulse يتم تغذية أحد الأوجه بها.. وبالتالي تختلف بقية خواص الأداء لكل نوع عن الآخر.



شكل رقم (١): الأشكال المختلفة للعضو الثابت والعضو الدوار للمحرك



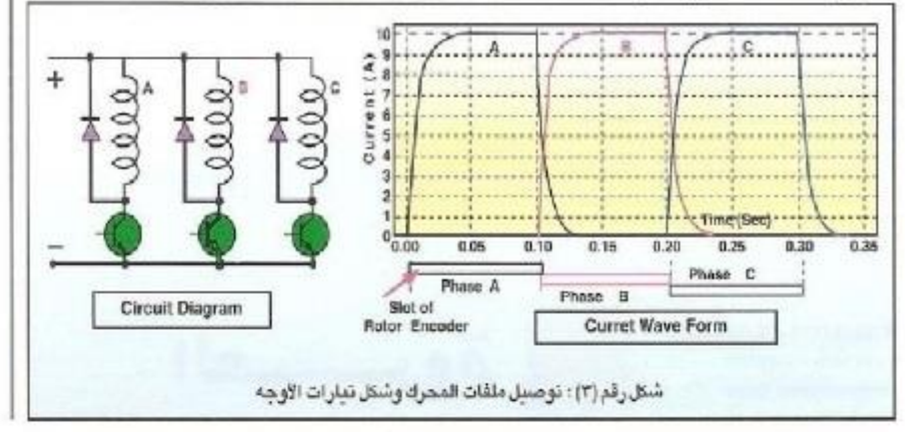
شكل رقم (٢): دوران العضو الدوار مع تبديل توصيل أوجه العضو الثابت

ومن المكونات المهمة في هذا المحرك.. قرص خفيف من البلاستيك أو الألومنيوم يثبت على عمود الدوران به فتحات قرب المحيط الخارجي.. حيث تثبت لمبة صغيرة وموحد ضوئي Photo Diode مع جسم المحرك بحيث تكون اللمبة في إحدى جهتي القرص والموحد الضوئي أمامها في الجهة الأخرى حتى يصل ضوء اللمبة إلى الموحد عندما تقع فتحة القرص بينهما.. ويحجب الضوء بعد مرور الفتحة عند دوران القرص. ويؤدي الضوء الساقط على الموحد إلى قيامه بتوصيل التيار إلى وجه العضو الثابت الواجب توصيله في هذا الوضع لأسنان العضو الدوار. وتسمى هذه المجموعة مبين موضع العضو الدوار Rotor Encoder.

نظرية عمل المحرك

يتم تغذية هذا المحرك بالتيار المستمر DC. بينما يغذي محرك الممانعة المغناطيسية التزامني من مصدر تيار متردد AC. وإذا تم تغذية هذا المحرك الانتقالي بالتيار المتردد.. يصعب التحكم في قيم تيارات المحرك بالقدر الذي يعطي عزوماً عالية واستقراراً في الأداء.

وإذا تم تغذية أحد الأوجه - الوجه A مثلاً - بالتيار المستمر.. فإن أقرب سنتين من أسنان العضو الدوار ستنجذب إلى سنتي الوجه A كما في الوضع الأول بالشكل رقم (٢). وإذا استمر التيار في الوجه A لأي زمن.. فإن العضو الدوار سوف يبقى ساكناً في هذا الوضع. ويتم الدوران من هذا الوضع بتغذية الوجه B مع فصل التيار عن الوجه A.. فينتقل المجال المغناطيسي للعضو الثابت من الوجه A إلى الوجه B في اتجاه دوران عقارب الساعة.. إلا أن أقرب سنتين في العضو الدوار إلى الوجه B تجعل العضو الدوار يدور في اتجاه عكس عقارب الساعة كما في الوضع الثاني بالشكل رقم (٢). وبهذا.. يتحرك العضو الدوار بزاوية انتقال Step Angle (θ) يتم حساب قيمتها من العلاقة ($\theta = \theta_r - \theta_s$).. حيث θ_r هي زاوية سنة العضو الدوار



شكل رقم (٣): توصيل ملفات المحرك وشكل تيارات الأوجه

وتساوي ($\theta_r = 360/S_r$)، وتكون S_r هي عدد أسنان العضو الدوار. وكذلك.. فإن θ_s هي زاوية سنة العضو الثابت وتساوي ($\theta_s = 360/S_s$).. حيث S_s هي عدد أسنان العضو الثابت.

ولاستمرار دوران المحرك بزاوية θ أخرى.. يتم توصيل الوجه C مع فصل الوجه B عن المصدر.. فيأخذ العضو الدوار الوضع الثالث في الشكل رقم (٢).. ثم يتم توصيل الوجه A مع فصل الوجه C فيأخذ العضو الدوار الوضع الرابع في الشكل رقم (٢). وهكذا.. يكون العضو الدوار قد تم دورانه بزاوية °٩٠ بعد ثلاث مرات يتم فيها تغيير التوصيل.. حيث يدور هذا المحرك في كل مرة زاوية °٣٠ وهي الزاوية θ. وعلى ذلك.. تكون عدد مرات التوصيل (عدد النبضات Pulses اللازمة لدوران العضو الدوار لفة واحدة) هي ($360/\theta$) وتساوي ١٢ نبضة لهذا المحرك ٦/ ٤ سنة.

ويلاحظ.. أنه بعد تبديل التوصيل من الوجه A إلى الوجه B ثم الوجه C.. يتكرر ذلك إلى الوجه A ثم B ثم C وهكذا. ولا داعي لعكس التيار مثلاً في الوجه A بعد الوجه C لأن ذلك من شأنه عكس القطبية من الشمالي N إلى الجنوبي S والعكس.

ولما كان العضو الدوار غير ممغنط.. فإن قوة الجذب سوف تكون واحدة سواءً كان القطب شمالياً أو جنوبياً. ولكن عكس التيار هذا.. يتم إذا كان العضو الدوار ذا مغناطيس دائم Permanent Mag-net في أنواع أخرى من المحركات وليس في هذا المحرك.

ويتم تبديل توصيل التيار بواسطة Rotor Encoder يقوم بتوصيل وفصل الترانزستورات المبينة في الشكل رقم (٣) عن طريق فتحات القرص.. إلا أنه عند فصل أي وجه وتلاشي التيار تستنتج قوة دافعة كهربية بملفات الوجه تضاف على جهد المصدر ليظهر جهد عال على الترانزستور يؤدي إلى احتراقه. لهذا.. يجب إخماد هذا الجهد Volt-age Suppression حيث تستخدم عدة طرق أهمها توصيل موحد Diode على طرفي الوجه في اتجاه لا يسمح بمرور تيار من المصدر الرئيسي خلال الترانزستور حتى لا يحدث قصر على كل من الوجه والمصدر.. ويتم التوصيل كما بالشكل رقم (٣). ويمر التيار بالوجه عند التوصيل.. حيث يتزايد بالتدريج مع الزمن نظراً لوجود حث ذاتي In-ductance (L) للوجه ويتم حساب التيار من العلاقة:

$$I = (V/R)\,(1-e^{-t/\tau})$$

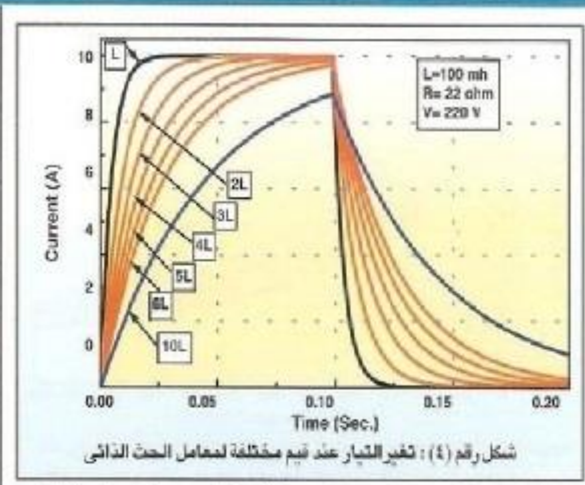
حيث: V جهد المنبع – R مقاومة الوجه – τ ثابت الزمن ($\tau = L/R$) – t الزمن.

وعند الفصل.. تتسبب الطاقة المختزنة في ملفات الوجه في مرور تيار في نفس اتجاه التيار خلال فترة التوصيل.. حيث يمر هذا التيار من خلال الموحد بشكل تيار دائري Cir-culating Current ويتم حساب هذا التيار من العلاقة:

$$I = (V/R)\,(e^{-(t-t_1)/\tau})$$

و يكون t_1 هو زمن فترة التوصيل. وإذا كان التيار في فترة التوصيل قد وصل إلى قيمة أقل من (V/R).. فيستبدل بالجزء (V/R) في العلاقة السابقة.

ويلاحظ.. أن هذا التيار الدائري يحدث عزماً سالباً ينقص العزم الكلي لأنه يتواجد مع تيار التوصيل للوجه التالي. لهذا.. يجب إنقاص هذا التيار الدائري بقدر الإمكان مع المحافظة على الجهد على أطراف الترانزستور بقيمة منخفضة يتحملها.. كما يجب تعديل فترة التوصيل بحيث لا يتواجد التيار الدائري مع تيار التوصيل بقدر الإمكان.



شكل رقم (٤) : تغير التيار عند قيم مختلفة لمعامل الحث الذاتى

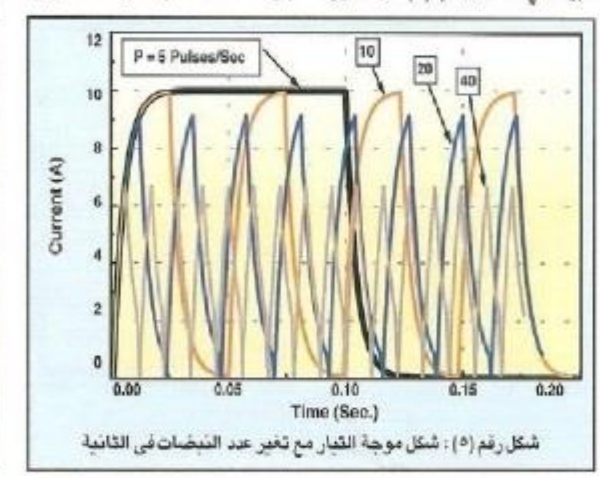
الأداء الانتقالي للمحرك

كلما كان التيار كبيراً خلال فترة التوصيل مع ثبات جهد المنبع كان ذلك أفضل.. لأنه يعني زيادة عزم المحرك. إلا أن زيادة معامل الحث الذاتي للفات الوجه L.. يؤدي إلى خفض التيار كما بالشكل رقم (٤). لهذا.. يجب زيادة طول الثغرة الهوائية بين العضو الثابت والعضو الدوار وضغط اللفات حول الأسنان بحيث تكون بأقل طول ممكن لنفس عدد اللفات حتى ينقص معامل الحث الذاتي وبالتالي تزداد مساحة مقطع الأسلاك لإنقاص ثابت الزمن.

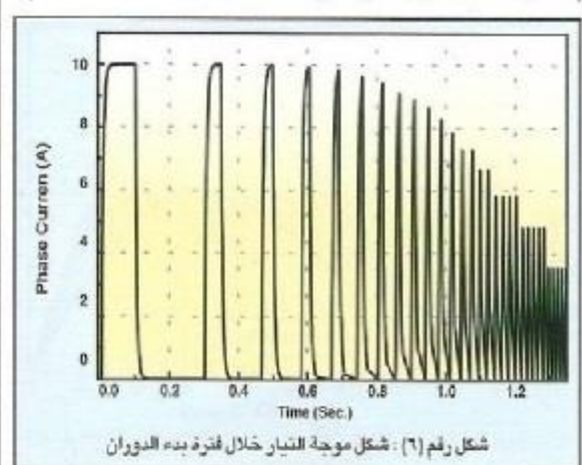
وكلما زاد معدل التوصيل والفصل Number of Pulses/Sec.. نقص زمن فترة التوصيل وقل التيار كما بالشكل رقم (٥). ويزداد هذا المعدل كلما زادت السرعة خلال فترة بدء الدوران للمحرك.. حيث يأخذ تغير التيار في أي وجه الشكل رقم (٦).. وتكون القيمة المتوسطة لتيار الوجه (كلما زاد عدد مرات التوصيل والفصل أي عدد النبضات للتيار في الثانية) في تناقص كما بالشكل رقم (٧). ويلاحظ.. أن زيادة عدد النبضات يعني زيادة السرعة.. لأن المحرك يدور بسرعة تزامنية مع عدد النبضات.. لأن اللفة الواحدة لدوران العضو الدوار تحتاج إلى ١٢ نبضة في هذا المحرك ٦/ ٤ سنة.. وبالتالي يتم حساب السرعة N باللفة في الدقيقة من عدد النبضات p في الثانية بالعلاقة $N = 60p/12$.

ولزيادة عزم المحرك وبالتالي إمكانية زيادة السرعة.. يجب زيادة جهد المنبع ذي التيار المستمر.. حيث يأخذ التيار الشكل رقم (٧). ويراعى.. أن وصول التيار إلى تيار الحمل الكامل الذي تتحمله ملفات المحرك يحد من زيادة الجهد إلى قيم أعلى.

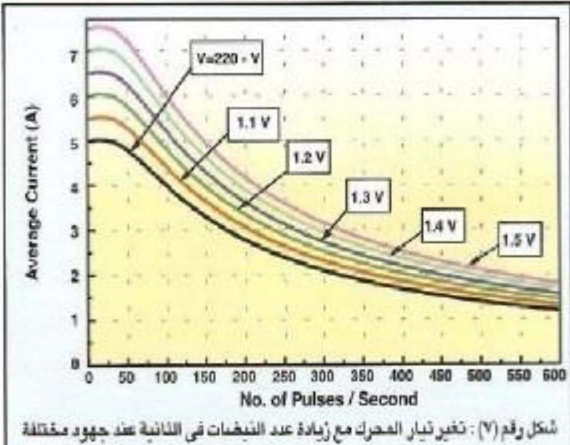
ولكي يعمل المحرك باستقرار– تقوم كل نبضة بتحريك العضو الدوار بزاوية °٣٠ – يجب أن يتحقق شرطان: أن يكون الجهد المسلط على المحرك كافياً لإمرار تيار بقيمة تعطي عزماً كافياً للتغلب على عزم الحمل



شكل رقم (٥) : شكل موجة التيار مع تغير عدد النبضات فى الثانية



شكل رقم (٦) : شكل موجة التيار خلال فترة بدء الدوران



شكل رقم (٧) : تغير تيار المحرك مع زيادة عدد النبضات في الثانية عند جهود مختلفة

شكل رقم (٨) : تغير التيار وزاوية العضو الدوار مع الزمن عند جهود مختلفة

وعزم الاحتكاك في المحرك.. أن يبقى التيار زمناً كافياً لتحرك العضو الدوار زاوية ٣٠ْ كاملة.. لأنه إذا كان الجهد منخفضاً كما بالشكل رقم (٨).. أي بقيمة (V = 0.8 pu) مثلاً.. فإن التيار سوف يكون منخفضاً كما بالشكل.

وخلال زمن توصيل مقداره ٠,١ث.. سوف يتحرك العضو الدوار زاوية ٢٥ْ فقط كما بالشكل، وفي النبضة التالية سوف يتحرك زاوية أقل من ٢٥ْ لأن العزم سوف ينخفض لزيادة الزاوية عند التوصيل عن ٣٠ْ.. وفي النبضات التالية يتناقص العزم حتى يصل إلى الصفر عندما تكون الزاوية ٤٥ْ وبالتالي يتوقف الدوران.. ويقال أن المحرك خرج عن تزامنه. أما إذا كان الجهد أكبر من الحالة السابقة وبقيمة V = 1 pu.. فإن التيار يكون كافياً بالكاد للوصول إلى زاوية تحرك ٣٠ْ. وإذا زاد الجهد عن ذلك (V= 1.2 pu).. فإن العضو الدوار سوف يتحرك بالزاوية ٣٠ْ في أقل من زمن فترة التوصيل لزيادة العزم.. وسوف يؤدي ذلك إلى حدوث تذبذبات للحركة حول الزاوية ٣٠ْ كما بالشكل رقم (٨).

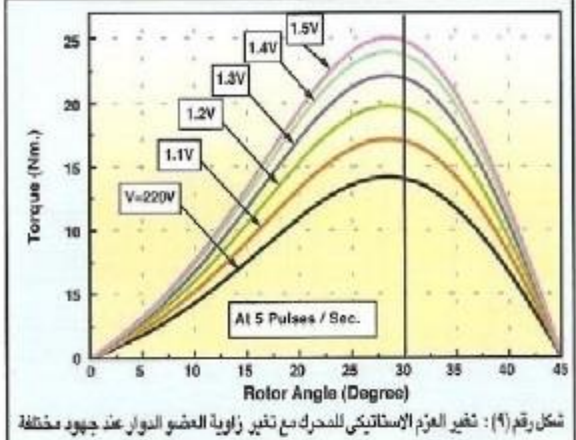
العزم الاستاتيكي للمحرك Static Torque

يمكن بسهولة قياس العزم الاستاتيكي للمحرك.. حيث يترك المحرك ساكناً ويتم توصيل وجه واحد إلي المصدر ذي التيار المستمر ويبقى التيار ماراً بالوجه حيث يصل إلى حالة الاستقرار وتكون قيمة التيار I هي I = V/R.. ثم نقوم بتعليق وزن صغير في طرف سلك مرن أو خيط مناسب ويتم لف الطرف الثاني للخيط حول عمود دوران المحرك أو حول طارة ذات قطر مناسب على العمود. ومع هذا التعليق.. يتحرك العضو الدوار زاوية ضد قوة الجذب المغناطيسي الناتج من تيار العضو الثابت.. وتقاس هذه الزاوية ..ومن ثم يتم حساب العزم من قيمة الوزن ونصف قطر الطارة. وكلما زادت قيمة الوزن المعلق - أي زاد العزم - تزداد زاوية انحراف العضو الدوار. ويكون العزم الأقصى عند زاوية انحراف أكبر من نصف الزاوية ٤٥ْ في هذا المحرك ٦/ ٤سنة.. وتكون زاوية أقصى عزم حوالي ٢٨ْ لهذا المحرك بسبب تغير عدد خطوط المجال المغناطيسي الناتج من العضو الثابت بطريقة غير منتظمة مع تغير زاوية الانحراف. وكلما زادت الزاوية عن زاوية أقصى عزم.. يجب تحميل عزم أقل من العزم الأقصى كما بالشكل رقم (٩). وبوصول الزاوية إلى ٤٥ْ يكون العزم (صفر).. لأن سنة وجه العضو الثابت تكون في منتصف المسافة بين سنتي العضو الدوار مما يجعل قوة الجذب متساوية لسنتي العضو الدوار الأمر الذي يحول دون تحرك العضو الدائر بأي زاوية. ومع زيادة الجهد المسلط على المحرك.. تزداد العزوم كما بالشكل رقم (٩). إلا أننا نلاحظ.. تناقص الزيادة في العزم برغم الزيادة المنتظمة في الجهد وبالتالي في تيار العضو الثابت.. ويرجع ذلك إلى التشبع الناتج في الحديد والذي يؤدي إلى نقص معدل تغير المجال بالنسبة للتيار.

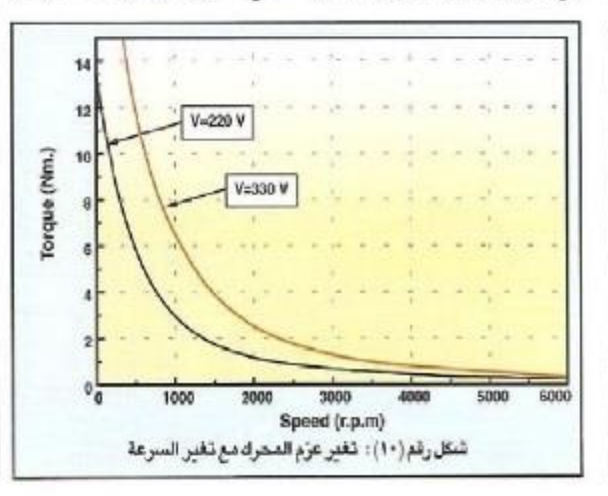
كما يجب ملاحظة.. أن المحرك أثناء الدوران يتم تبديل التوصيل فيه من وجه إلى آخر. وعندما يكون المحرك بدون حمل.. فإن زاوية سنة العضو الدائر بالنسبة لسنة العضو الثابت في بدء التوصيل تكون مساوية ٣٠ْ في هذا المحرك ٦/ ٤ سنة - الخط الرأسي في الشكل رقم (٩). ومع تحميل المحرك.. تزداد هذه الزاوية عن ٣٠ْ بمقدار زاوية الحمل Load Angle التي تزداد بزيادة عزم الحمل. ولهذا.. لا يمكن تحميل المحرك خلال الدوران بقيمة العزم الأقصى.. حيث يقل عزم الحمل عن ذلك.

خواص الأداء للمحرك

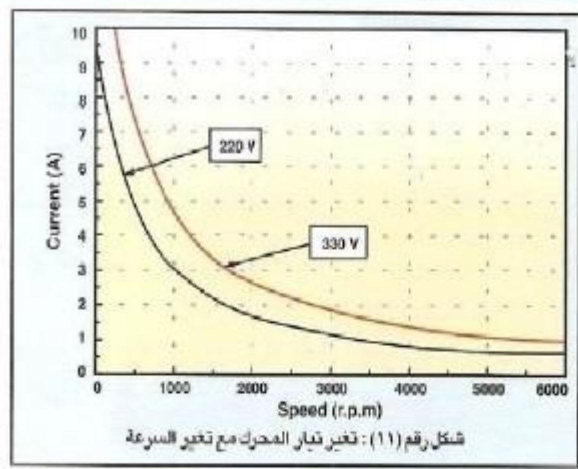
لحساب خواص الأداء للمحرك.. نجد أن العزم T في أي لحظة يتم حسابه من العلاقة ($T= 0.5\ I^2\ dL/d\theta$).. حيث: I تيار المحرك في اللحظة المطلوب حساب العزم عندها - ($dL/d\theta$) معدل تغير معامل الحث الذاتي للوجه بالنسبة لتغير الزاوية بين سنة العضو الدائر وسنة الوجه في العضو الثابت. ونلاحظ.. أن كل



شكل رقم (٩) : تغير العزم الاستاتيكي للمحرك مع تغير زاوية العضو الدوار عند جهود مختلفة



شكل رقم (١٠) : تغير عزم المحرك مع تغير السرعة



شكل رقم (١١): تغير تيار المحرك مع تغير السرعة

شكل رقم (١٢): تغير قدرة دخل وخرج المحرك مع تغير السرعة

قيمة لحظية للتيار I تعطي عزماً أقصى عند θ تساوي ٢٨ .. أما معامل الحث الذاتي للوجه (L) فإنه يتغير بتغير الزاوية بين سنة العضو الدوار وسنة الوجه θ.. حيث تكون L بأكبر قيمة لها L_d عندما $\theta = 0$.. بينما تكون بأقل قيمة L_q عندما تكون θ = ٤٥ في هذا المحرك (٦/٤ سنة). ويمكن حساب قيمة كل من L_d، L_q بطريقة مشابهة للمستخدمة مع محرك الممانعة المغناطيسية التزامني.. حيث نجد أن $L_d = L_e C_d$.. وتكون L_e هي معامل الحث الذاتي للوجه عندما يكون العضو الدوار اسطواني الشكل.. وتكون L_e أكبر من L_d ويتم حساب المعامل C_d من العلاقة:

$$C_d = a + (1-a)\{\beta + [(\sin(\pi\beta)/\pi)\}$$

حيث: a نسبة أصغر طول للثغرة الهوائية إلى أكبر طول – β نسبة طول قوس سنة العضو الدوار إلى طول خطوة سنة العضو الدوار.

كما يتم حساب L_q من العلاقة:

$$L_q = L_e C_q$$

حيث:

$$C_q = a + (1-a)\{\beta - [\sin(\pi\beta)/\pi]\}$$

أما التغير (dL/dθ) خلال تغير الزاوية من الصفر إلى ٤٥.. فيتم حسابه بمعرفة التغير dL من العلاقة التقريبية:

$$L(\theta) = L_q + (L_d - L_q)\cos(4\theta)$$

وبتفاضل هذه العلاقة بالنسبة للزاوية θ نحصل على:

$$dL/d\theta = -4(L_d - L_q)\sin(4\theta)$$

وبإهمال الإشارة السالبة.. يتم حساب عزم المحرك T من العلاقة:

$$T = 2I^2(L_d - L_q)\sin(4\theta)$$

وحيث أن التيار اللحظي يتغير مع تغير السرعة كما بالشكل رقم (٦).. فإن العزم اللحظي يأخذ شكلاً قريباً من شكل التيار بثبات الزاوية θ. وبأخذ θ = ٢٨.. نحصل على العزم الأقصى اللحظي ومنه يتم حساب القيمة المتوسطة للعزم الأقصى مع تغير السرعة والتي تكون كما بالشكل رقم (١٠) عند جهدين ٢٢٠، ٣٣٠ف حيث يتناقص هذا العزم مع زيادة السرعة بشكل يشبه تغير عزم محركات التوالي Series Motors.

وخلال هذا التغير في السرعة.. تتغير القيمة المتوسطة للتيار الكلي الداخلي للمحرك كما بالشكل رقم (١١).. حيث يتناقص التيار بمعدل كبير مع زيادة السرعة.. مما يمكننا من زيادة الجهد بقيم عالية إلى القيمة التي توصلنا إلى أقصى تيار يتحمله المحرك.. ولا خوف من زيادة التشبع بزيادة الجهد لأن التشبع يزداد بزيادة التيار وليس بزيادة الجهد.

أما تغير كل من قدرة دخل وخرج المحرك مع تغير السرعة.. فإنها كما بالشكل رقم (١٢).. حيث تكون قدرة الدخل عالية بدرجة كبيرة عن المحركات التقليدية عند السرعات المنخفضة بسبب زيادة التيار.. ثم تتناقص قدرة الدخل مع تزايد قدرة الخرج بزيادة السرعة لتقترب قدرة الخرج من قدرة الدخل عند السرعات العالية. ولهذا.. يفضل أن يعمل هذا المحرك باستمرار عند السرعات العالية حتى تكون كفاءة المحرك عالية.. وبتزايد جهد للمحرك تتزايد قدرة الخرج كما بالشكل.

وتتغير كفاءة المحرك مع تغير السرعة كما بالشكل رقم (١٣).. حيث تستمر في الزيادة كلما زادت السرعة. وينطبق منحنى الكفاءة عند جهد ٢٢٠ ف مع نظيره عند جهد ٣٣٠ ف.

وعندما يعمل المحرك مع الحمل بحالة استقرار Steady State عند سرعة ٦٠٠٠ لفة/دقيقة.. يمكن حساب زمن وصول المحرك من سرعة الصفر إلى هذه السرعة وهو ما يسمى بزمن بدء الدوران. ويتم حساب هذا الزمن t بالثانية من العلاقة:

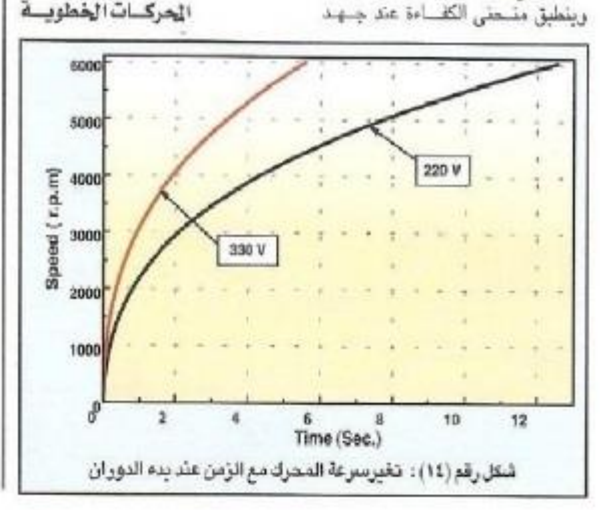
$$t = J\int d\omega/(T - T_L)$$

حيث: J معامل القصور الذاتي للأجزاء المتحركة – T عزم المحرك – T_L عزم الحمل – $d\omega = 2\pi\, dN/60$. وتكون dN هي الجزء الصغير من تغير السرعة – حيث يتم إجراء هذا التكامل رقمياً على الحاسب الآلي، وتنتج علاقة تغير السرعة مع زمن بدء الدوران كما بالشكل رقم (١٤) والذي يبين تزايد السرعة بمعدل كبير عن المحركات التقليدية. وتصل السرعة إلى قيمتها النهائية في زمن أقل كلما زاد جهد التشغيل بسبب زيادة عزم المحرك كما بالشكل.

في العدد القادم:

المحركات الخطوية

شكل رقم (١٣): تغير كفاءة المحرك مع تغير السرعة



شكل رقم (١٤): تغير سرعة المحرك مع الزمن عند بدء الدوران

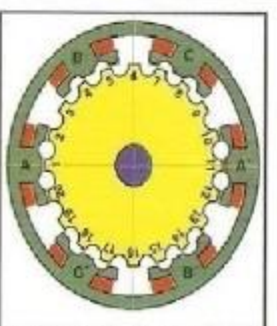
المحركات الخطوية Stepping Motors

د. فتحى عبد القادر
رئيس قسم الهندسة الكهربية وأستاذ الآلات الكهربية ـ هندسة شبين الكوم

يستخدم هذا النوع من المحركات فى التحكم الوضعى Position Control سواءً كان التحكم بزاوية واحدة صغيرة للحمل أو عدة زوايا.. أو مسافة واحدة صغيرة أو عدة مسافات متكررة.. كما فى آلات الطباعة للحاسب الآلى التى تحتاج لتحريك الورقة مسافة سطر رأسياً للانتقال إلى السطر التالى لكتابته وهكذا.. كما تحتاج رأس الكتابة إلى لتحريكها أفقياً لمسافة حرف واحد أو أكثر. ويستخدم هذا المحرك أيضاً فى الإنسان الآلى Robot وكثير من المعدات التى تتطلب تحكماً موضعياً.. حيث يتم تغذية المحرك بنبضة واحدة عبارة عن تيار مستمر لزمن بسيط.. تؤدى إلى دوران العضو الدوار للمحرك زاويةً صغيرة تقل كثيراً عن زاوية محرك الممانعة المغناطيسية الانتقالى Switched Reluctance Motor. وعندما تتم التغذية بعدد معين من النبضات.. فإن الدوران يتم بنفس العدد من الزوايا المتساوية التى يسمى كل منها بزاوية الخطوة Step Angle. مع ملاحظة أن أية نبضة تغذى أحد ملفات العضو الثابت.. والنبضة التالية تغذى ملفاً آخر.. كما كان يحدث فى محرك الممانعة المغنا[illegible] الانتقالى.

مكونات المحرك

يشبه هذا المحرك فى تكوينه محرك الممانعة المغناطيسية الانتقالى.. إلا أنه يختلف فى عدد وشكل أسنان كل من العضو الثابت والعضو الدوار بحيث يزداد عدد الأسنان لإنقاص زاوية الخطوة. وتعتمد الفكرة الأساسية لهذا المحرك على إحداث قوة جذب بين سنتين متقابلتين من كل من العضو الثابت



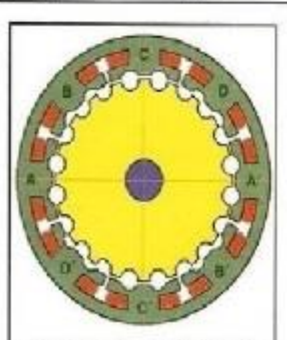
شكل رقم (١): محرك خطوة ثلاثة أوجه ٢٠ سنة ذو خطوة ٦ درجات

والعضو الدوار عند تغذية العضو الثابت بالتيار المستمر.. بينما تقل قوة الجذب بين باقى أسنان العضو الثابت والعضو الدوار. وعند نقل تغذية العضو الثابت إلى ملف آخر.. تحدث قوة الجذب بين سنتين أخريين مما يؤدى إلى دوران العضو الدوار زاويةً خطوة واحدة.

وتتعدد أنواع وأشكال هذا المحرك تعدداً كبيراً للحصول على زاوية خطوة تختلف من شكل إلى آخر.. وكذلك لزيادة عزم المحرك وتبسيط دوائر التحكم فى التشغيل. ومن أهم هذه الأنواع:

١ ـ محرك الممانعة المغناطيسية المتغيرة Variable Reluctance Motor:

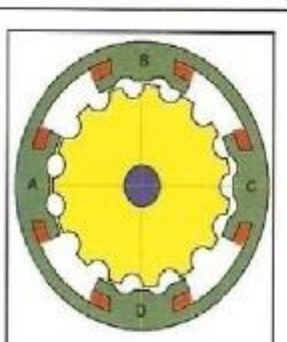
ويتكون من عدد محدود من الأقطاب البارزة فى العضو الثابت إلا أن حذاء كل قطب Pole Shoe يتكون من عدد من الأسنان بحيث تعطى مجموع أسنان هذه الأقطاب جملة أسنان العضو الثابت التى تختلف فى العدد عن مجموع أسنان العضو الدوار الذى يتشكل من الحديد بدون أية ملفات. ويوضع على كل قطب فى العضو الثابت ملف يوصل بالتوالى



شكل رقم (٢): محرك خطوة أسنانه غير متلائمة ولن يتمكن من الدوران

مع ملف القطب المقابل ليشكل كل قطبين متقابلين وجهاً واحداً كما فى الشكل رقم (١).

ويتراوح عدد أوجه العضو الثابت بين وجهين إلى حوالى خمسة أوجه. وعند تغذية الوجة الأول Phase A بالتيار المستمر.. ينشأ مجال مغناطيسى يجذب أسنان العضو الدوار لتصبح مقابلة لأسنان الوجه A كما بالشكل.. أما بقية أسنان العضو الدوار فإنها لا تكون مقابلة لأسنان أى من الوجهين الآخرين C،B. ويلاحظ أن خطوة أسنان القطب تساوى خطوة أسنان العضو الدوار مما يجعل ثلاثة من أسنان القطب تنطبق مع ثلاثة من أسنان العضو الدوار حتى يزداد العزم عن حالة انطباق سنة واحدة لكل من القطب والعضو الدوار. وعند تبديل التغذية بفصل الوجه A وتوصيل الوجه B لمصدر التيار المستمر.. يجذب مجال الوجه B أقرب أسنان العضو الدوار فيدور فى اتجاه عقارب الساعة بزاوية خطوة واحدة.. ويتم بعد ذلك تبديل التوصيل من الوجه B إلى الوجه C ويدور العضو الدوار زاوية خطوة ثانية.. وهكذا..

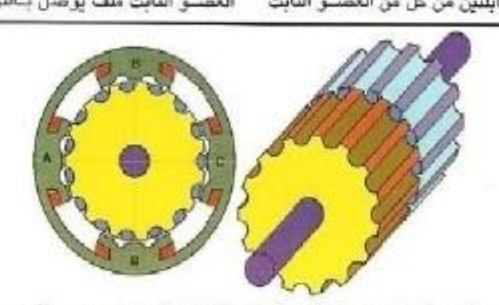


شكل رقم (٣): محرك خطوة أربعة أوجه ١٥ سنة ذو خطوة ٦ درجات

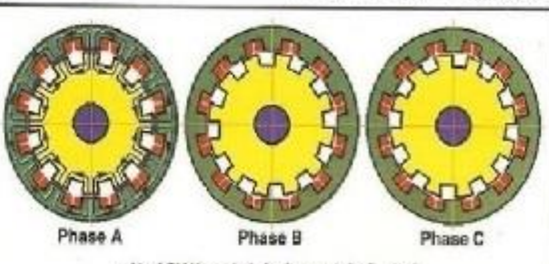
تتكرر زاوية الخطوة بتكرار تبديل التوصيل.

ويتم حساب زاوية الخطوة لمحرك الشكل رقم (١) بحساب زاوية الوجه B بالنسبة للوجه A والتى تكون ٦٠° ثم حساب الزاوية بين سنة العضو الدوار رقم ١ المقابلة لمنتصف الوجه A وسنة العضو الدوار رقم ٤ التى سوف تتحرك لتكون فى منتصف الوجه B وهذه الزاوية بين السنة ١ والسنة ٤ تساوى ثلاث زوايا سنة.. وحيث أن زاوية السنة تساوى ٣٦٠° مقسومة على عدد أسنان العضو الدوار والتى تساوى ٢٠ سنة فى هذا الشكل.. فإن زاوية السنة تكون ١٨° وبالتالى تكون الزاوية بين السنتين ١،٤ مقدارها ٥٤° وبذلك تكون زاوية الخطوة لهذا المحرك هى ٦٠° ـ ٥٤ = ٦°.. بينما كانت زاوية هذه الخطوة فى محرك الممانعة الانتقالى ٤،٦ سنة مقدارها ٣٠°.

ومن هذا.. تستنتج العلاقة الرياضية العامة لحساب زاوية الخطوة لهذا النوع من المحركات الخطوية.. من زاوية سنة العضو الدوار γ وعدد الأوجه m حيث نجد



شكل رقم (٤): محرك خطوة ذو الممانعة المتغيرة مكون من جزأين



شكل رقم (٥): محرك خطوة من ثلاثة أجزاء
١٢ سنة لكل من العضوين الثابت والدوار ـ مجاله قطرى

أن ($\theta = \zeta_r / m$)..

ويلاحظ.. أن عدد أسنان العضو الدوار يجب أن يتناسب وعدد أسنان وعدد أوجه العضو الثابت بحيث يعطى زاوية الخطوة التى نحتاجها. فإذا وضعنا نفس العضو الدوار ٢٠ سنة فى عضو ثابت أربعة أوجه كما بالشكل رقم (٢).. فإن العضو الدوار لن يدور فى أى اتجاه لأن تغذية الوجه A تجعل أسنان العضو الدوار مقابلة تماماً لأسنان الوجه A كما بالشكل. وبتبديل التوصيل إلى الوجه B.. تكون أسنان العضو الدوار مقابلة لمنتصف المسافة بين أسنان الوجه B وهذا الوضع لن يسبب أى حركة للعضو الدوار وبالتالى فإن المحرك لن يتمكن من الدوران بأى خطوة عند تبديل التوصيل إلى أى من الأوجه الأربعة.

ويمكن جعل كل قطب يمثل وجهاً كما بالشكل رقم (٣) المكون من أربعة أقطاب أو أربعة أوجه والعضو الدوار مكون من ١٥ سنة.. وعند تغذية الوجه A تنطبق ثلاثة من أسنان العضو الدوار مع ثلاثة من أسنان وجه العضو الثابت كما بالشكل ولا تنطبق بقية أسنان العضو الدوار مع أسنان أى وجه آخر فى هذا الوضع. وعند تغذية الوجه B بدلاً من الوجه A.. يتحرك العضو الدوار فى اتجاه ضد عقارب الساعة بزاوية ٦° لتنطبق أقرب أسنان للعضو الدوار مع أسنان الوجه B . وهكذا.. يستمر الدوران بزاوية الخطوة فى نفس الاتجاه مع التبديل إلى بقية الأوجه.. إلا أنه يجب ملاحظة أن عزم هذا المحرك يقل عن عزم المحرك الذى يمثل الوجه فيه قطبان كما كان فى الشكل رقم (١).

٢ ـ محرك الممانعة المغناطيسية المتغيرة متكرر الأجزاء Multi Stack Variable Reluctance Motor:

هناك أربعة أنواع من هذا المحرك:

أ ـ النوع الأول: يستخدم للتغلب على نقص العزم فى النوع الموضح بالشكل رقم (٣) حيث يتكون المحرك من جزأين متكررين بحيث تكون أقطاب الجزأين على نفس المحور الموازى لمحور عامود الدوران.. بينما ينحرف العضو الدوار للجزء الثانى عن العضو الدوار للجزء الأول بزاوية تساوى نصف زاوية خطوة السنة كما بالشكل رقم (٤).. وتكون زاوية الخطوة لهذا النوع هى $\theta = \zeta_r / 2m$. ويتم تغذية الوجه A للجزء الأول مع الوجه C للجزء الثانى ثم الوجه B للجزء الأول مع الوجه D للجزء الثانى وهكذا.

ب ـ النوع الثانى: يستخدم فيه التكرار لانتقاص زاوية الخطوة فى أحوال كثيرة تتطلب ذلك. فإذا أخذنا المحرك الموضح فى الشكل رقم (١) والذى كانت زاوية خطوته ٦°.. فإنه يمكننا الحصول على زاوية خطوة بثلث قيمة هذه الزاوية.. أى بمقدار درجتين فقط إذا تم تكرار أجزاء المحرك لتصبح ثلاثة أجزاء بحيث ينحرف العضو الدوار للجزء الثانى بزاوية درجتين عن العضو الدوار للجزء الأول. وينحرف العضو الدوار للجزء الثالث بزاوية درجتين عن العضو الدوار للجزء الثانى.. إلا أن التغذية هنا تتم للوجه A فى الجزء الأول ثم تستبدل للوجه A فى الجزء الثانى ثم تستبدل للوجه A فى الجزء الثالث.. ثم تكرر فى باقى الأوجه مع الأجزاء الثلاثة.. وفى كل مرة يتحرك العضو الدوار بزاوية درجتين. ولهذا النوع.. يتم حساب زاوية الخطوة من العلاقة ($\theta = \zeta_r / mn$).. حيث m عدد الأوجه ـ n عدد مرات التكرار ـ ζ_r زاوية خطوة سنة العضو الدوار. وفى هذا النوع لا يشترط أن تتساوى مرات التكرار بعدد الأوجه.

جـ ـ النوع الثالث: وهو ذو عزم أكبر بأضعاف مضاعفة من الأنواع السابقة. وفيه يتكون كل جزء من عدد متساو من الأسنان فى كل من العضوين الثابت والدوار كما فى الشكل رقم (٥) الذى تكون فيه عدد الأسنان ١٢ سنة لكل من العضو الثابت والعضو الدوار.. ويوضع ملف حول كل سنة من أسنان العضو الثابت وتوصل جميع ملفات العضو الثابت معاً بالتوالى أو التوازى حسب جهد وتيار مصدر التغذية.. وتمثل جميع هذه الملفات وجهاً واحداً مثل الوجه A مع ملاحظة أن كل سنة تمثل قطباً يختلف فى قطبيته عن السنة المجاورة.. ويكون عدد خطوط المجال المغناطيسى الناتج من جميع هذه الأقطاب الاثنى عشر متماثلاً لكل قطب مع الآخر. ولا يجب هنا عمل الملفات بطريقة المحركات التقليدية (التأثيرية مثلاً) بحيث تكون نصف عدد الأسنان اليمنى مثلاً قطباً شمالياً والنصف الأيسر قطباً جنوبياً.. لأنه فى هذه الحالة سوف تكون كثافة المجال المغناطيسى فى منتصف القطب عالية وتقل فى أطراف كل قطب (طبقاً للتوزيع الجيبى لكثافة المجال) الأمر الذى ينقص كثيراً من عزم المحرك.

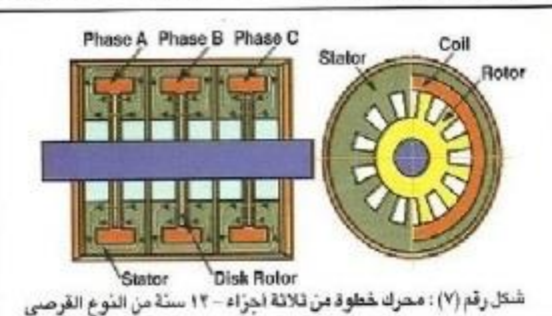
وفى هذا النوع.. تم زيادة العزم لأنه عند توصيل الوجه A تحدث قوة الجذب بين عدد الأسنان جميعها للوجه ـ ١٢ سنة ـ وليس بين جزء فقط من الأسنان كما كان فى الأنواع السابقة. والوجهان الثانى B والثالث C هما تكرار للوجه الأول A بكل أجزائه.. إلا أن العضو الدوار للوجه B ينحرف عن العضو الدوار للوجه A. كما أن الوجه C ينحرف عن الوجه B بزاوية تعادل ثلث زاوية السنة عندما يكون عدد الأوجه ثلاثة. ويمكن أن يكون عدد الأوجه أكثر من ثلاثة.. وفى هذه الحالة ينحرف كل عضو دوار عن الآخر بزاوية تساوى زاوية السنة مقسومة على عدد الأوجه.. وزاوية الانحراف هذه تساوى زاوية الخطوة. وكلما زاد عدد الأوجه نقصت زاوية الخطوة حيث يتم حسابها فى هذا النوع من العلاقة ($\theta = \zeta_r / 2m$).

ويتم دوران العضو الدوار فى هذا النوع بتغذية الوجه A من مصدر التيار المستمر ثم تبديل التغذية بالوجه B ثم بالوجه C ثم بالوجه A مرة أخرى. وهكذا.. تتعاقب تغذية جزء ثم الذى يليه ولهذا.. يسمى هذا المحرك «بالمتعاقب» Cascade.. وتكون خطوط مجاله المغناطيسى فى الاتجاه القطرى Radial Flux كما بالشكل رقم (٥).

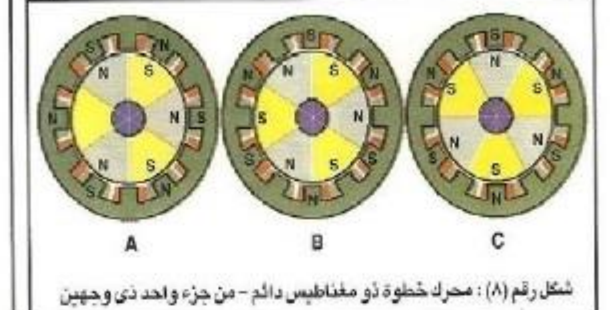
د ـ النوع الرابع: يتميز عن النوع الثالث فى أنه تم استبدال عدد الملفات الكثيرة لكل وجه (١٢ ملف) بملف واحد يكون محوره فى اتجاه محور دوران المحرك ويعطى خطوط مجال مغناطيسى فى اتجاه محور الدوران كما بالشكل رقم (٦).. ولهذا فإنه يسمى «بالمحرك ذى المجال المغناطيسى المحورى» Axial Flux. ويتم تشغيل هذا النوع بنفس الأسلوب النوع الثالث.

وعندما يراد أن يكون العضو الدوار ذا وزن خفيف حتى يقل عزم

شكل رقم (٦): محرك خطوة من ثلاثة أجزاء
١٢ سنة لكل من العضوين الثابت والدوار - مجاله محورى



شكل رقم (٧) : محرك خطوة من ثلاثة أجزاء - ١٢ سنة من النوع القرصى



شكل رقم (٨) : محرك خطوة ذو مغناطيس دائم - من جزء واحد ذى وجهين



القصور الذاتى وتتحسن خواص أدائه الديناميكي.. يستخدم شكل قرصى Disk Type للعضو الدوار كما بالشكل رقم (٧) بدلاً من الشكل الاسطوانى السابق ويتم حساب زاوية الخطوة بنفس طريقة النوع الثالث.

٣ - المحرك ذو المغناطيس الدائم :Permanent Magnet Motor

يستخدم المغناطيس الدائم فى العضو الدوار لمحرك الخطوة لزيادة عزم المحرك. ولكى يعمل هذا المحرك.. يجب أن يحتوى العضو الثابت على عدد من الأقطاب يساوى ضعف عدد أقطاب العضو الدوار وبحيث ترتب ملفات أقطاب العضو الثابت فى مجموعتين تكون كل منها وجهاً.. وكل وجه يعطى عند تغذيته بالتيار المستمر عدداً من الأقطاب يساوى عدد أقطاب العضو الدوار كما بالشكل رقم (٨).

وعند تغذية الوجه الأول.. يأخذ العضو الدوار الوضع المبين بالجزء A من الشكل رقم (٨).. حيث تنشأ أقطاب هذا الوجه وبينها أقطاب الوجه الثانى لكن بدون أى مجال مغناطيسى منها. وبتبديل التغذية من الوجه الأول إلى الثاني.. تنشأ أقطاب الوجه الثانى كما بالجزء B من الشكل رقم (٨) وتظهر قوى التجاذب والتنافر بين أقطاب العضو الثابت والعضو الدوار في هذا الوضع مما يسبب عزماً يدير العضو الدوار فى اتجاه عقارب الساعة حتى يتحرك زاوية خطوة يستقر بعدها فى الوضع المبين بالجزء C من الشكل رقم (٨).. ثم يتم تبديل التغذية من الوجه الثانى إلى الوجه الأول مع ملاحظة أن تغذية الوجه الأول فى هذه المرة يجب أن يتم بحيث يكون التيار فى اتجاه عكسى لما كان عليه فى المرة السابقة حتى يستمر فى الدوران فى نفس اتجاه عقارب الساعة وإلا عاد العضو الدوار فى الاتجاه المضاد إلى الوضع السابق.

وعلى هذا.. فإن تعاقب توصيل الأوجه يتم من الوجه الأول إلى الثانى ثم إلى الأول فالثانى وهكذا مع عكس اتجاه التيار لكل وجه فى كل مرة عن المرة السابقة.

ويتم حساب زاوية الخطوة فى هذا النوع بالعلاقة ($\theta = \zeta_r/m$) حيث زاوية قطب العضو الدوار ζ_r وعدد الأوجه m.. وتكون زاوية الخطوة للنوع الموضح بالشكل رقم (٨) = ٣٠.

وفى نوع ثان لهذا المحرك يشمل الوجه جميع أقطاب العضو الثابت ويكون عدد أقطاب العضو الدوار مساو لعدد أقطاب العضو الثابت.. كما أنّ المحرك يجب أن يتكرر مرتين على الأقل Two Stack وتكون أقطاب العضو الدوار للجزأين على استقامة واحدة.. بينما تنحرف أقطاب العضو الثابت للجزأين عن بعضهما بزاوية تساوى نصف زاوية القطب. ويمكن تكرار الأجزاء - (الأوجه) - أكثر من مرتين لإنقاص زاوية الخطوة.. ويكون انحراف كل جزء عن الآخر بزاوية تساوى زاوية القطب مقسومة على عدد الأوجه. ويتم حساب زاوية الخطوة لهذا المحرك من العلاقة ($\theta = \zeta_r / 2m$).

وفى نوع ثالث لهذا المحرك.. يتشكل الوجه من ملف واحد يكون محورياً.. أى أن مجاله المغناطيس فى اتجاه محور المحرك Axial Flux.. وتشكل أقطاب العضو الثابت بشكل مخلبى Claw Poles أى أن الأقطاب تكون كالمخالب المتداخلة كما بالشكل رقم (٩).. وتكون أقطاب العضو الدوار ممتدة لجزئى المحرك وبعدد مساو لعدد أقطاب العضو الثابت كما بالشكل.

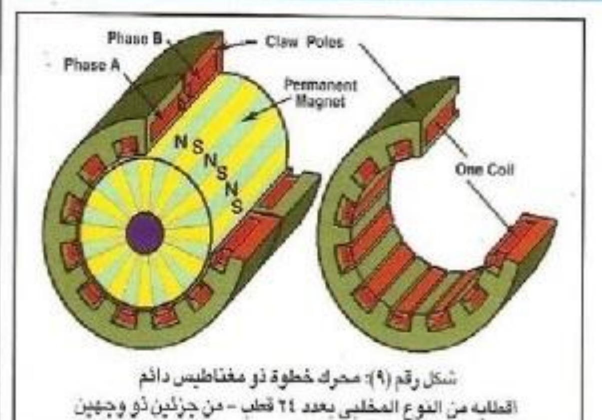
وبنفس أسلوب النوع الثانى.. تنحرف أقطاب العضو الثابت لكل جزء عن الآخر بزاوية تساوى زاوية القطب مقسومة على عدد الأجزاء عدد (الأوجه) - وتحسب زاوية الخطوة من العلاقة ($\theta = \zeta_r / 2m$).

٤ - المحرك المهجن Hybrid Motor:

يعتبر هذا النوع هجيناً من محرك الممانعة المتغيرة ومحرك المغناطيس الدائم وينتج العزم الكلى للمحرك من عزمين. الأول هو الناتج من الشكل المسنن للعضو الثابت والعضو الدوار - عزم الممانعة المغناطيسية المتغيرة Reluctance Torque - والثانى هو الناتج من المغناطيس الدائم Permanent Magnet Torque. ولهذا.. يكون عزم هذا المحرك أكبر من عزم أى من محركى الممانعة المغناطيسية المتغيرة أو المغناطيس الدائم.

ويتكون المحرك كما بالشكل رقم (١٠) من مغناطيس دائم بشكل اسطوانى حول محور الدوران.. يحيط به جزءا العضو الدوار المسنن المماثل لمحرك الممانعة المغناطيسية المتغيرة ذى الجزأين بالشكل رقم (٤) كما أن العضو الثابت لهذا المحرك يماثل أيضاً العضو الثابت لمحرك الشكل رقم (٤). ويتم تغذية الوجه A فى الجزء الأول مع الوجه C فى الجزء الثانى ليعطى الجزء الأول دائماً قطباً جنوبياً S مقابل القطب الشمالى N فى العضو الدوار.. بينما يعطى الجزء الثانى دائماً قطباً شمالياً N مقابل القطب الجنوبى S للعضو الدوار. وبتبديل التغذية كما حدث فى محرك الشكل رقم (٤) إلى الوجه B فى الجزء الأول مع الوجه D فى الجزء الثاني.. يتحرك العضو الدوار زاوية خطوة بعزم كبير عن محرك الشكل رقم (٤).

ويتم حساب زاوية الخطوة بنفس



شكل رقم (٩): محرك خطوة ذو مغناطيس دائم أقطابه من النوع المخلبى بعدد ٢٤ قطب - من جزئين ذو وجهين

طريقة محرك الشكل رقم (٤). ويلاحظ أن تعاقب تغذية الأوجه يتم بحيث يكون اتجاه التيار ثابتاً فى كل مرة لأى وجه.. ولا يتم عكس اتجاه التيار كما يحدث مع محرك المغناطيس الدائم. كما يلاحظ.. أن خطوط المجال المغناطيسى الناتجة من تغذية أقطاب العضو الثابت يجب أن تكون فى نفس اتجاه خطوط المجال المغناطيسى الناتجة من المغناطيس الدائم حتى يساعد المجال بعضه ويزداد العزم.

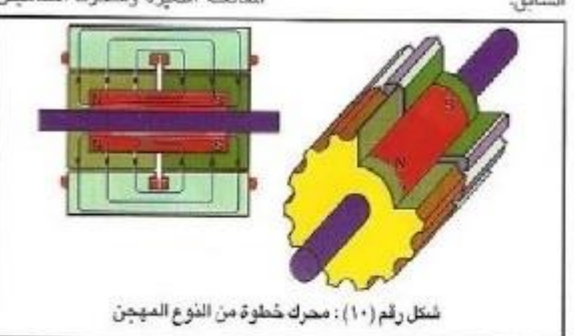
ولتكرار أجزاء هذا المحرك.. يتم تكرار الجزأين معاً مرتين لإنقاص زاوية الخطوة إلى النصف.. أو يتم تكرار الجزأين ثلاث مرات لإنقاص زاوية الخطوة إلى الثلث.

منظومات تغذية أوجه المحرك Excitation Systems

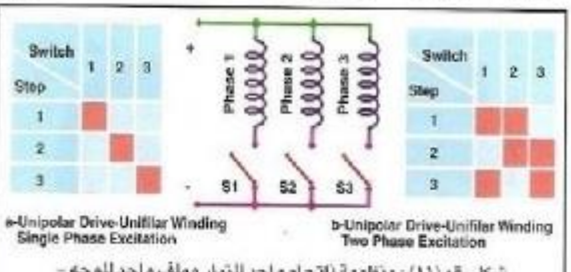
يتم توصيل ملفات أوجه المحرك وتغذيتها من مصدر التيار المستمر بأى من الطرق الثلاث التالية:

١ - تغذية وجه واحد One Phase Excitation:

وفى هذه الطريقة.. يتم تغذية وجه واحد ثم فصله وتغذية الوجه الثانى ثم فصله وتغذية الوجه الثالث. ولعكس اتجاه الدوران.. يتم عكس تعاقب الأوجه من الأول إلى الثالث ثم الثانى وهكذا. وبتغيير التغذية من وجه إلى آخر.. يتحرك العضو الدوران زاوية خطوة واحدة.. وتكون



شكل رقم (١٠) : محرك خطوة من النوع المهجن



شكل رقم (١١) : منظومة (إتجاه واحد للتيار وملف واحد للوجه - التغذية إما وجه واحد أو وجهان معاً)



أسنان العضو الدوار على استقامة أسنان وجه العضو الثابت المغذى.

٢ ـ تغذية وجهين معاً Two Phase Excitation:

يتم تغذية وجهين معاً على التوازى حيث يغذى الوجه الأول مع الوجه الثانى وللدوران بزاوية خطوة يتم تغذية الوجه الثانى مع الوجه الثالث.. ولزاوية خطوة أخرى يغذى الوجه الثالث مع الوجه الأول وهكذا. وتكون زاوية الخطوة فى هذه الطريقة مساوية لزاوية الخطوة فى الطريقة السابقة.. إلا أن أسنان العضو الدوار لا تكون على استقامة أسنان وجهى العضو الثابت المغذيين وإنما فى وضع متوسط عند الاستقرار.

وتتميز هذه الطريقة عن السابقة.. فى إحداث عزم اضمحلال لتأرجح العضو الدوار عند الانتقال من زاوية إلى أخرى.. مما يؤدى إلى سرعة استقرار العضو الدوار. ويحدث هذا الاضمحلال Damping بسبب توصيل الوجهين على التوازى مما يؤدى إلى تيار دائرى بينهما نابع من التأرجح ذاته.

٣ ـ تغذية وجه ثم وجهين Single Phase/ Two Phase:

فى هذه الطريقة.. يتم تغذية الوجه الأول ويأخذ العضو الدوار وضع استقامة أسنانه مع أسنان العضو الثابت.. ثم يغذى الوجه الثاني دون فصل الوجه الأول فيتحرك العضو الدوار نصف زاوية خطوة.. ثم يفصل الوجه الأول ويبقي الوجه الثاني فيتحرك العضو الدوار نصف زاوية خطوة أخرى. وهكذا.. بالتبديل من وجه إلى وجهين ثم وجه ثم وجهين. وفى كل مرة.. يتم التحرك بنصف زاوية الخطوة.. ولهذا تسمى هذه الطريقة أحياناً بطريقة نصف الخطوة Half Step Method.

منظومات توجيه التيار Drive Circuits

يتم توجيه التيار في أى وجه بأى من الطريقتين التاليتين:

١ ـ اتجاه واحد للتيار Unipolar Drive:

تستخدم هذه الطريقة مع المحركات من النوع ذى الممانعة المغناطيسية المتغيرة Variable Reluctance حيث يمر التيار في اتجاه واحد فى أى وجه مع الانتقال من زاوية خطوة إلى أخرى ومع تكرار تبديل التغذية من وجه إلى آخر لا يكون هناك ما يدعو لعكس اتجاه التيار في أى وجه عن اتجاهه فى المرة السابقة.. لأن أسنان العضو الدوار تنجذب إلى أسنان العضو الثابت سواء كان العضو الثابت قطبا شماليا أو جنوبيًا.. الأمر الذى يبسط كثيراً تصميم الدوائر الالكترونية اللازمة لتغذية أوجه المحرك.. حيث يحتاج محرك الثلاثة أوجه إلى ثلاثة مفاتيح الكترونية فقط.

٢ ـ اتجاهان متضادان للتيار Bipolar Drive:

تستخدم هذه الطريقة مع محركات المغناطيس الدائم وبعض أنواع المحرك المهجن.. حيث أنه عند تبديل التغذية من وجه إلى الأوجه الأخرى ثم العودة إلى نفس الوجه يلزم عكس اتجاه التيار في كل وجه عن اتجاهه فى المرة السابقة حتى يستمر المحرك فى الدوران فى نفس الاتجاه.. مما يتطلب زيادة عدد المفاتيح الالكترونية بحيث يكون لكل وجه أربعة مفاتيح بدلاً من مفتاح واحد كما فى الطريقة السابقة.

منظومات ملفات الوجه Phase Winding Systems

تنظم ملفات كل وجه بإحدى الطريقتين التاليتين:

١ ـ مجموعة واحدة Unifilar winding:

تتكون ملفات الوجه الواحد عادة من ملفى قطبين متقابلين بحيث تشكل مجموعة واحدة متصلة على التوالى أو التوازى.. وتستخدم هذه الطريقة مع محركات الممانعة المغناطيسية المتغيرة.

٢ ـ مجموعتان متضادتان Bifilar Winding:

يتم فى هذه الطريقة مضاعفة ملفات كل وجه بحيث تختص مجموعة بإنتاج مجال مغناطيسى فى اتجاه معين وتختص المجموعة الأخرى بإنتاج مجال في الاتجاه المضاد.. مما يؤدى إلى انقاص عدد المفاتيح الالكترونية إلى النصف وذلك بدلاً من المفاتيح الكثيرة اللازمة لعكس اتجاه التيار مع محركات المغناطيس الدائم وبعض أنواع المحرك المهجن.

Switch / Step	1	2	3	4	5	6
1	■					
2			■			
3					■	
4		■				
5				■		
6						■

a-Unipolar Drive Unifilar Winding
Single phase Excitation

Phase 1 Phase 2 Phase 3
S1 S2 S3 S4 S5 S6

Switch / Step	1	2	3	4	5	6
1	■			■		
2			■			■
3		■			■	

b-Unipolar Drive Unifilar Winding
Two phase Excitation

شكل رقم (١٢): منظومة (إتجاه واحد للتيار وملفان للوجه - التغذية إما وجه واحد او وجهان معاً)

توضح الاشكال (١١) - (١٤) أمثلة لمنظومات: التغذية وتوجيه التيار وملفات الوجه.

يوضح الشكل رقم (١١) منظومة (اتجاه واحد للتيار وملف واحد للوجه وتغذية وجه واحد) - والجدول (a) بهذا الشكل يوضح تتابع تغذية الأوجه بتتابع توصيل المفاتيح للحصول على تتابع زاوية الخطوة. وتستخدم هذه الطريقة وهى الأبسط مع محركات الممانعة المغناطيسية المتغيرة.. وعادة ما تكون المفاتيح S3, S2, S1 من الترانزستور سريع الاستجابة للفصل والتوصيل.

كما يوضح الجدول (b) تتابع منظومة (اتجاه واحد للتيار وملف واحد للوجه وتغذية وجهين معاً) وهي بسيطة وتستخدم مع محرك الممانعة المغناطيسية المتغيرة وتتفوق على منظومة الجدول (a) فى سرعة استقرار حركة المحرك وخفض تذبذبات هذه الحركة.

ويوضح الشكل رقم (١٢) منظومة (اتجاه واحد للتيار وملفان للوجه وتغذية وجه واحد) كبديل لمنظومة الشكل التالى رقم (١٣) مع خفض عدد المفاتيح إلى النصف.. لكن بوجود ملفين للوجه بدلاً من ملف واحد ويبين الجدول (a) تتابع توصيل المفاتيح لست خطوات. ولتكرار الخطوات يتم تكرار نفس التتابع.

يبين الجدول (b) بالشكل رقم (١٢) تتابع منظومة (اتجاه واحد للتيار وملفان للوجه وتغذية وجهين معاً) وهى بديلة لمنظومة الجدول (a) بهذا الشكل مع التفوق عليها فى سرعة استقرار المحرك الناتج عن تغذية كل وجهين معاً.

ويبين الشكل رقم (١٣) منظومة (اتجاهان متضادان للتيار وملف واحد للوجه وتغذية وجه واحد) حيث تحتوى على ١٢ مفتاحاً لمحرك ثلاثة أوجه ويتم تتابع توصيل المفاتيح كما بالجدول للحصول على ست خطوات ولتكرار هذه الخطوات يكرر نفس التتابع. والاضطرار لاستخدام هذه المنظومة المعقدة لا يتأتى إلا فى حالة استخدام محركات ذات مغناطيس دائم وبعض أنواع المحرك المهجن.

ويبين الشكل رقم (١٤) منظومة (اتجاهان متضادان للتيار وملف واحد للوجه وتغذية وجهين معاً).. وهى بديلة لمنظومة الشكل رقم (١٣) فى حالة وجود ملف واحد للوجه وتتفوق عليها فى خفض عدد المفاتيح إلى النصف وكذلك سرعة استقرار حركة المحرك.

ويمكن استنتاج منظومات أخرى لتعمل عند تغذية وجه واحد ثم وجهين معاً.. وأيضاً منظومات تعمل مع أى أعدد أخرى لأوجه المحرك.

ويلاحظ أن خواص الأداء لهذا المحرك تتشابه كثيراً مع خواص الأداء لمحرك الممانعة المغناطيسية الانتقالى.

فى العدد القادم:

محركات المعاوقة المغناطيسية

Switch / Step	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	■			■								
2					■			■				
3									■			■
4		■	■									
5						■	■					
6										■	■	

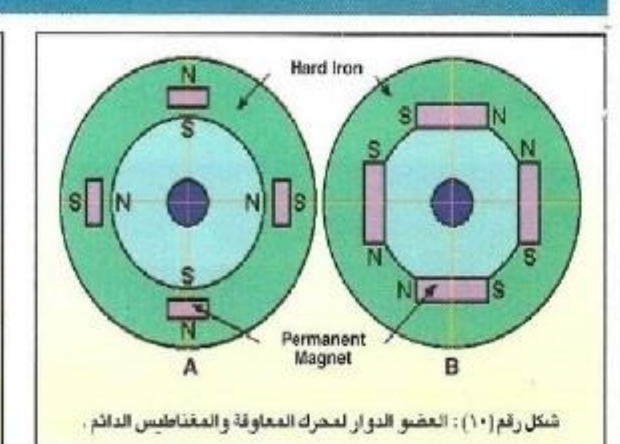
S2 S4 S6 S7 S9 S11
Phase1 Phase2 Phase3
S2 S4 S6 S8 S10 S12

Bipolar Drive-Unifilar Winding - Single Phase Excitatio

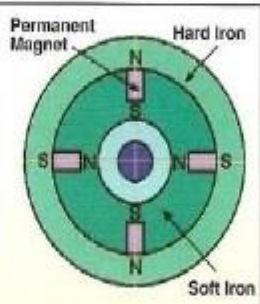
شكل رقم (١٣) : منظومة (اتجاهان متضادان للتيار وملف واحد للوجه - التغذية وجه واحد)



شكل رقم (١٤) : منظومة (اتجاهان متضادان للتيار وملف واحد للوجه - التغذية وجهان معاً)



شكل رقم (١٠) : العضو الدوار لمحرك المعاوقة والمغناطيس الدائم.



شكل رقم (١١) : العضو الدوار لمحرك المعاوقة والممانعة والمغناطيس الدائم.

من سرعة التزامن.

وحيث أن العضو الدوار يكون منتظم الشكل في محرك المعاوقة المغناطيسية.. فإن ممانعة المغنطة X_d في المحور المباشر Direct Axis تكون مساوية لممانعة المغنطة X_q في المحور العمودي Quadra-ture Axis. ولكي ينشأ عزم ممانعة مغناطيسية.. يجب إنقاص X_q بزيادة المقاومة المغناطيسية لمسار المجال المغناطيسي في المحور العمودي وذلك بإنقاص كمية الحديد في هذا المحور في عدد من المناطق مساو لعدد الأقطاب الناتجة من العضو الثابت.

ويتم إنقاص X_q بعدة طرق منها:

- قطع عدة أجزاء مساوية لعدد الأقطاب من السطح الخارجي للأسطوانة الحديدية ذات منحنى التعويق المغناطيسي العريض كما بالجزء A من الشكل رقم (٩) للمحرك ذي الأربعة أقطاب.
- قطع الأربعة أجزاء من السطح الداخلي للأسطوانة الحديدية كما بالجزء B من الشكل رقم (٩).

وتتميز الطريقة الثانية بالمحافظة على انخفاض تذبذبات العزم في المحرك.. إلا أن عزم الممانعة المغناطيسية فيها يكون أقل منه في الطريقة الأولى. ولا يجب المغالاة في قطع أجزاء كبيرة من الاسطوانة الحديدية سواءً من الخارج أو الداخل.. لأن الزيادة الكبيرة في حجم الجزء المقطوع يؤدي إلى إنقاص عزم التعويق المغناطيسي بنسبة كبيرة عن الزيادة في عزم الممانعة المغناطيسية.

وللمحافظة على عزم التعويق المغناطيسي عالياً وعدم وجود تذبذبات في العزم.. يتم الإبقاء على الاسطوانة الحديدية الخارجية المصنعة من الصلب الناشف Hard Iron والخاصة بإيجاد عزم التعويق المغناطيسي بدون قطع من الداخل أو الخارج.. ويتم إضافة اسطوانة داخلية مجزأة من الحديد المطاوع Sof Iron لتعطي عزم الممانعة المغناطيسية كما بالجزء C من الشكل رقم (٩). وينشأ عزم الممانعة في هذه الحالة بنفس نظرية محرك الممانعة المغناطيسية المجزأ Segmental Reluctance Motor والذي سبق الحديث عنه في العدد (٦٩). ويلاحظ في هذا النوع.. أن سمك الاسطوانة الخارجية يجب أن يقل قليلاً عن مثيله في المحرك التقليدي حتى يجبر المجال المغناطيسي على المرور في الاسطوانة الداخلية المجزأة وبالتالي إيجاد عزم مناسب للممانعة.

٢ - محرك المعاوقة والمغناطيس الدائم Hysteresis _ Permanent Magnet Motor:

يتم في هذا النوع إضافة المغناطيس الدائم إلى العضو الدوار لمحرك المعاوقة المغناطيسية حتى يزداد عزم المحرك عند سرعة التزامن بمقدار العزم الناتج من المغناطيس الدائم. ويتم وضع المغناطيس الدائم بالعضو الدوار بعدة طرق.. منها الطريقة الموضحة بالجزء A من الشكل رقم (١٠). ويجب المحافظة على ترتيب قطبية المغناطيسيات الدائمة كما بالشكل.. لأن تبديل القطبية في اثنين منها مثلاً يؤدي إلى إنقاص عدد الاقطاب الناتجة من المغناطيسيات الدائمة عن عدد أقطاب العضو الثابت مما يؤدي إلى تدهور عزم المحرك.

وتتميز الطريقة الأخرى الموضحة في الجزء B من الشكل رقم (١٠) عن الطريقة السابقة.. في المحافظة أكثر على عزم المعاوقة وزيادة أكثر في عزم المغناطيس الدائم.. مع ضرورة المحافظة على ترتيب القطبية الموضح.. لأن تبديل قطبية قطبين متقابلين مثلاً يجعل الدائرة المغناطيسية لمجال المغناطيسيات الدائمة تكتمل خلال العضو الدوار دون العبور إلى العضو الثابت.. وفي هذه الحالة يتلاشى عزم المغناطيس الدائم.

وفي محرك المعاوقة والمغناطيس الدائم.. يزداد عزم المحرك من المغناطيس الدائم فقط عندما يكون دائراً بسرعة التزامن.. وهي السرعة التي تعمل بها كل هذه الأنواع خلال الدوران باستقرار مع الحمل. أما خلال فترة بدء الدوران.. فإن وجود المغناطيس الدائم لا يسبب أية زيادة في العزم.. بل العكس فإنه يسبب بعض المشاكل مثل تذبذبات العزم التي لم تكن موجودة في محرك المعاوقة المغناطيسية التقليدي.

٣ - محرك المعاوقة والممانعة والمغناطيس الدائم Hysteresis - Reluctance - Permanent Mag-net Motor:

يجمع هذا النوع.. بين الأنواع الثلاثة للعزوم من المعاوقة ومن الممانعة ومن المغناطيس الدائم. ولهذا.. فإن العضو الدوار يتكون من اسطوانة خارجية من الحديد الناشف ذي التعويق المغناطيسي الكبير لإيجاد عزم التعويق المغناطيسي.. كما توجد اسطوانة داخلية مجزأة من الحديد المطاوع لإيجاد عزم الممانعة المغناطيسية.. ويتم إضافة المغناطيس الدائم كما بالشكل رقم (١١) لايجاد عزم المغناطيس الدائم.

ويتميز هذا النوع بعزوم تزامنية عالية وتحسن باقي خواصه عن الأنواع السابقة.

في العدد القادم:
محركات المغناطيس الدائم

محركات المعاوقة المغناطيسية Hysteresis Motors

د. فتحي عبد القــادر
رئيس قسم الهندسة الكهربية وأستاذ الآلات الكهربية - هندسة شبين الكوم

يعتبر هذا النوع من المحركات غريباً في تكوينه ونظرية تشغيله وخواصه عن باقي أنواع المحركات الكهربية. فهو يتميز ببساطة التركيب والدوران بسرعة التزامن الثابتة مثل المحركات التزامنية.. وعند بدء الدوران يعطي عزماً عالياً يكاد يكون ثابتاً منذ البدء ومساوياً لأقصى عزم للمحرك بشكل أفضل مما لو كان محركاً تأثيرياً.

مكونات المحرك

يتكون المحرك من عضو ثابت يماثل العضو الثابت للمحركات التأثيرية ثلاثية الأوجه أو ذات الوجه الواحد من رقائق الصلب السليكوني على شكل اسطوانة بها مجاري لوضع الملفات التي تكون إما ثلاثية الأوجه أو ذات وجه واحد بمجموعتين للبدء والدوران.

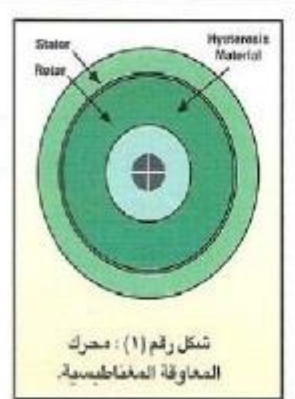
أما العضو الدوار للمحرك.. فيتكون من أسطوانة من الحديد المصمت بنفس طول رقائق حديد العضو الثابت وبمساحة مقطع كافية لإمرار خطوط المجال المغناطيسي الناتج من العضو الثابت.. وتكون هذه المساحة شاملة لكل العضو الدوار حتى محور الدوران في المحركات صغيرة القدرة. أما في المحركات الأكبر.. فإن جزءاً من العضو الدوار بين محور الدوران والأسطوانة الحديدية يملأ عادة بالألومنيوم - شكل رقم(١).

وتنشأ الخواص الأساسية لهذا المحرك واختلافها عن باقي أنواع المحركات.. من نوعية الحديد المستخدم في اسطوانة حديد العضو الدوار.. والذي يكون من نوع ذي معاوقة مغناطيسية كبيرة.. وهو ما يعبر عنه بالعرض الكبير لمنحنى التعويق المغناطيسي Hysteresis Loop والذي يتواجد في المواد الحديدية ذات الصلابة العالية Hard Magnetic Materials والتي تستخدم في تصنيع المغناطيس الدائم Permanent Magnet. وهكذا.. فإن العضو الدوار هنا لا يحتوي على أي ملفات وبالتالي فإنه لا يحتاج إلى التغذية من أي مصدر كهربي.

نظرية التشغيل

ينشأ دوران كل المحركات الكهربية من قوى الجذب والتنافر بين أقطاب العضو الثابت وأقطاب العضو الدوار عدا محركات الممانعة المغناطيسية Reluctance Motors والمحركات الخطوية Stepping Motors حيث تنشأ الأقطاب من العضو الثابت فقط. وينشأ عزم الدوران من جذب أقطاب العضو الثابت للأجزاء الحديدية البارزة من العضو الدوار والذي لا يشترط وجود أقطاب به.

أما الدوران في هذا المحرك.. فإنه ينشأ من أقطاب العضو الثابت التي - يستنتج منها أقطاب في العضو الدوار تتأخر عن أقطاب العضو الثابت بزاوية في الفراغ. وينشأ العزم من قوة الجذب بين أقطاب العضو الثابت والأقطاب المستنتجة بالعضو الدوار.. إلا أن أقطاب العضو الدوار لا تنتج من تيار يستنتج في

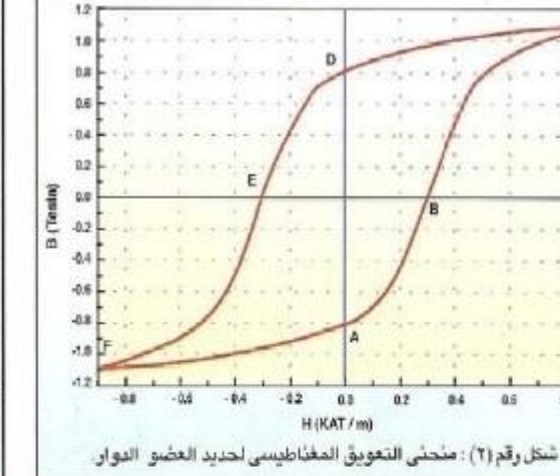


شكل رقم (١) : محرك المعاوقة المغناطيسية.

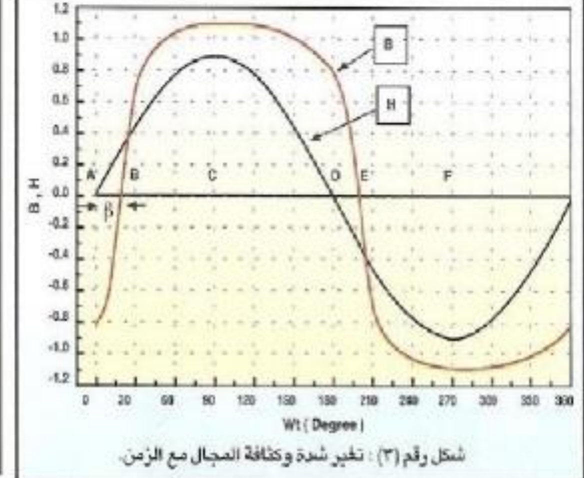
العضو الدوار نفسه كما كان في المحرك التأثيري مثلاً.. وإنما تستنتج بأسلوب خاص بهذا المحرك من نظرية التعويق المغناطيسي.

وإذا تم عمل ملف على قطعة من حديد العضو الدوار وتم إمرار تيار متردد بهذا الملف.. فإنه يمكن معرفة قيم كثافة المجال المغناطيسي الناتج عن هذا التيار من منحنى التعويق المغناطيسي لحديد العضو الدوار كما بالشكل رقم (٢).. حيث عندما يكون التيار (صفر) وفي الاتجاه للزيادة الموجبة (نقطة A) تكون لكثافة المجال المغناطيسي B قيمة سالبة تعبر عن المغناطيسية المتبقية في الحديد. وبزيادة التيار.. تنخفض كثافة المجال إلى أن تتلاشى عند النقطة B وباستمرار زيادة التيار.. تتزايد كثافة المجال في الاتجاه الموجب إلى أن يصل التيار إلى أقصى قيمة له عند النقطة C حيث تكون كثافة المجال في أقصى قيمة لها أيضاً. وبتناقص التيار.. يتناقص كثافة المجال إلى أن تصل إلى قيمة موجبة عالية عند النقطة D برغم وصول التيار إلى الصفر. وهكذا.. يتكرر هذا الجزء من المنحنى في النصف السالب للتيار.. ونحصل على منحنى التعويق المغناطيسي.. مع ملاحظة أن تغير التيار هو نفسه تغير شدة المجال المغناطيسي H الذي يمثل الأمبير لفات الملف.

وإذا تم رسم نفس قيم كل من شدة وكثافة المجال مع الزمن.. نحصل على الشكل رقم (٣) مع نفس تتابع النقاط (A ، B ، ...).. حيث تكون موجة شدة المجال المغناطيسي تابعة لشكل موجة التيار كموجة جيبية Sinusoidal بينما تأخذ موجة كثافة المجال المغناطيسي شكلاً مختلفاً عن الشكل الجيبي. وأهم ما يجب ملاحظته في هذا الشكل.. أن موجة كثافة المجال المغناطيسي تتأخر عن موجة شدة المجال بزاوية β مما يعتبر سبباً رئيسياً لنشوء عزم للمحرك.. وكلما زادت الزاوية β زاد عزم المحرك وتكون أقصى زيادة عندما تصل هذه الزاوية إلى ٩٠°.. إلا أن هذه الزاوية تكون في العادة في حدود ٣٠° وفقاً لخواص الأنواع المتاحة من الحديد للاستخدام في هذا المحرك. ويلاحظ.. أن هذه الزاوية تكون صغيرة جداً في أنواع الحديد الطري أو المطاوع Soft Iron أو الصلب السليكوني.. حيث يكون



شكل رقم (٢) : منحنى التعويق المغناطيسي لحديد العضو الدوار.



شكل رقم (٣) : تغير شدة وكثافة المجال مع الزمن.

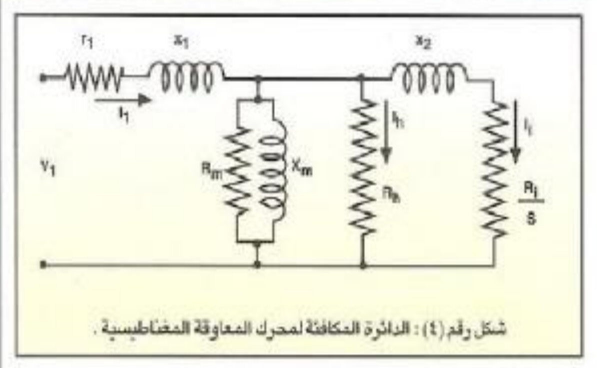
عرض منحنى التعويق المغناطيسي ضيقاً جدا لإنقاص مفاقيد الحديد. ولهذا.. فإن مثل هذه الأنواع لا تصلح للاستخدام مع هذا المحرك لأن العزم الناتج سوف يكون صغيرا جدا.

ونظراً لأن العضو الثابت لهذا المحرك يمر به ثلاثة تيارات ثلاثية الأوجه في المحركات ثلاثية الأوجه.. وتياران بينهما زاوية زمنية في محركات الوجه الواحد.. فإنه ينتج لهذه التيارات من العضو الثابت عدد من الأقطاب تدور في الفراغ فيما يطلق عليه المجال الدائرى Rotating Field. ويمر مجال هذه الأقطاب من خلال الجزء الحديدى للعضو الدوار.. حيث يستنتج فيه نفس عدد أقطاب العضو الثابت بسبب التعويق المغناطيسي العريض لحديد العضو الدوار.. وتتأخر أقطاب العضو الدوار عن أقطاب العضو الثابت في الفراغ بالزاوية β التى تكون ثابتة تقريباً منذ بدء دوران العضو الدوار.. وخلال تزايد السرعة حتى الوصول إلى سرعة التزامن. وفي هذه الحالة. يتناسب عزم المحرك T مع مجال العضو الثابت $\emptyset_s$ ومجال العضو الدوار $\emptyset_r$ وجيب الزاوية β. اى أن $T \alpha \emptyset_s \emptyset_r \sin \beta$ .. ويكون هذا العزم ثابت القيمة عند أية سرعة. بوصول المحرك إلى سرعة التزامن.. فإنه يبقى عند هذه السرعة كأي محرك تزامني من النوع الذى يحتوى على المغناطيس الدائم بالعضو الدوار.. إلا أنه يتفوق على محرك المغناطيس الدائم في العزم الكبير والمستقر دون تذبذب طوال فترة تزايد السرعة عند البدء.. بينما يكون عزم محرك المغناطيس الدائم خلال هذه الفترة صغيراً وبه تذبذبات كثيرة.

تحليل أداء المحرك

عندما تكون ملفات العضو الثابت لهذا المحرك من النوع ثلاثي الأوجه.. فإن الدائرة المكافئة للوجه تكون كما بالشكل رقم (٤). ونظراً لأن حديد العضو الدوار يكون من النوع المصمت وليس كرقائق.. فإن التيارات الاعصارية أو الدوامية Eddy Currents تتواجد بالعضو الدوار وتنتج عزماً تأثيرياً Induction Torque.. مما يجعل الدائرة المكافئة لهذا المحرك مشابهة للدائرة المكافئة للمحرك التأثيرى مع إضافة المقاومة R_h لتعبر عن التعويق المغناطيسي في المحرك. وقد وضعت هذه المقاومة بالتوازى مع ممانعة المغنطة X_m المعبرة عن مجال المغنطة لأنها تتأثر مباشرة بمجال المغنطة الواصل من العضو الثابت إلى العضو الدوار. وبهذا نحصل على عزمين في هذا المحرك.. العزم الأساسي وهو عزم التعويق المغناطيسي Hysteresis Torque .. والعزم الثاني وهو العزم التأثيرى Induction Torque وتكون قيمته صغيرة بسبب تياره الصغير للزيادة الكبيرة في مقاومة حديد العضو الدوار Ri مقارنة بمقاومة الاسلاك النحاسية أو الالومنيوم في العضو الدوار للمحرك التأثيرى التقليدى.

وتمثل المقاومة R_m مفاقيد حديد العضو الثابت للمحرك.. والمقاومة r_1 مقاومة الوجه لملفات العضو الثابت.. والممانعة X_1 ممانعة الهروب لمجال العضو الثابت.. X_2 ممانعة الهروب لمجال العضو الدوار. يتم حساب العزم التأثيرى للمحرك بنفس الأسلوب المستخدم مع المحرك التأثيرى التقليدى.. أما عزم التعويق المغناطيسي فيتم حسابه بمعرفة قدرة التعويق المغناطيسي P_h في المقاومة R_h من العلاقة $(P_h = 3I_h^2 R_h)$ حيث



شكل رقم (٤): الدائرة المكافئة لمحرك المعاوقة المغناطيسية.

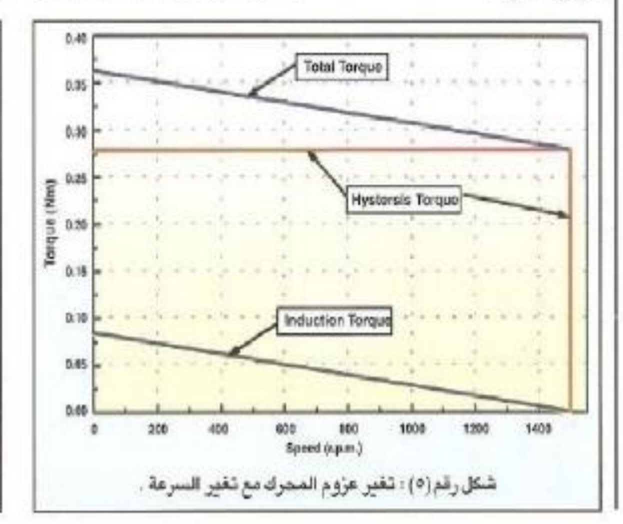
I_h هو تيار المقاومة R_h كما بالشكل رقم (٤).

ويلاحظ.. أن قدرة التعويق المغناطيسي P_h تستهلك كلها كمفقود تعويق مغناطيسي P_{hL} فى حديد العضو الدوار عند سكون هذا العضو. ومع تزايد السرعة.. تتناقص القدرة المفقودة في التعويق المغناطيسي بعلاقة خطية. لأنها تتناسب مع سرعة قطع المجال المغناطيسي لحديد العضو الدوار. أى أن.. $(P_{hL} = SP_h)$.. حيث S هى الانزلاق Slip .

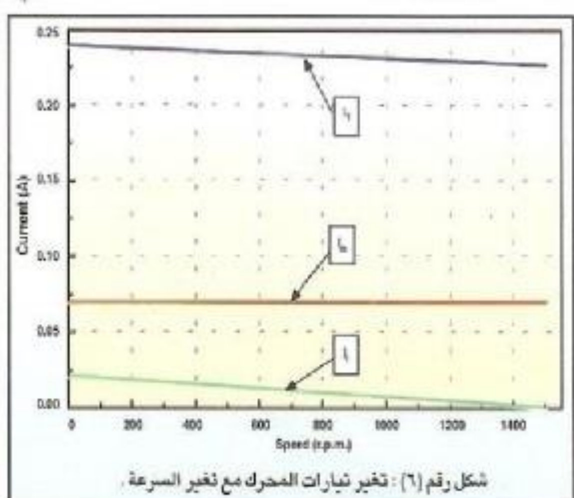
أما قدرة التعويق المغناطيسي التى تعطي عزم التعويق المغناطيسي P_{hl}.. فإنها جزء من قدرة التعويق المغناطيسي الكلية P_h حسب العلاقة $[P_{hl} = (1-S)P_h]$.. مع ملاحظة أن القدرة الكلية P_h تساوى مجموع القدرتين $(P_{hl} + P_{hL})$ عند أية سرعة. وعند السكون. تكون كل القدرة مفقودة.. أى أن $(P_h = P_{hL})$. أما عند سرعة التزامن.. فإن كل القدرة تكون لإعطاء عزم التعويق المغناطيسي.. أى أن $(P_h = P_{hl})$.

وبذلك.. يمكن حساب عزم التعويق المغناطيسي T_h من العلاقة $(T_h = P_{hl}/\omega)$ حيث $\omega = 2\pi n/60$ و n سرعة المحرك. ومن الدائرة المكافئة للمحرك.. يتم حساب بقية خواص المحرك كما في الأشكال أرقام (٥) - (٨).

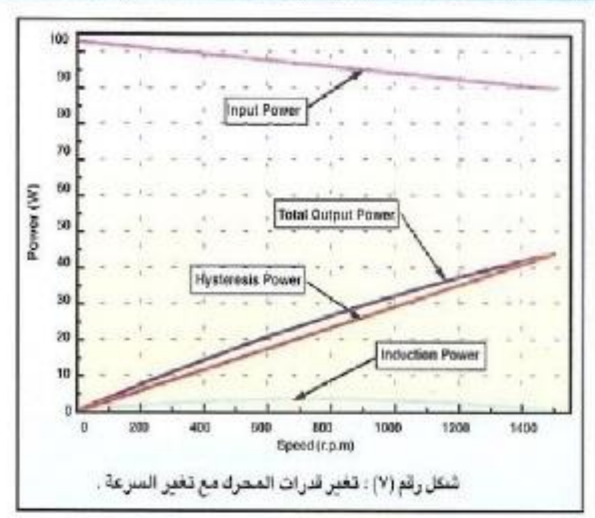
يبين الشكل رقم (٥) تغير عزوم المحرك مع تغير السرعة.. حيث يبقى عزم التعويق المغناطيسي ثابتاً منذ بدء الدوران وحتى الوصول إلى سرعة التزامن. أما العزم التأثيرى.. فإنه يكون كبيراً عند البدء ثم يتناقص خطياً مع زيادة السرعة ولا يأخذ شكل عزم المحرك التأثيرى التقليدى لأن مقاومة العضو الدوار تكون عالية مثل المحرك ذى العضو الدوار المصمت Solid Rotor أو محرك السرفو التأثيرى.. كما أن نسبة العزم التأثيرى تقل عن عزم التعويق المغناطيسي.. ويكون العزم الكلي للمحرك هو مجموع العزمين - شكل رقم (٥). وعلى هذا.. فإن هذا المحرك يتميز بالعزم الكبير خلال فترة بدء الدوران والذى يمكنه من البدء وهو محمل والوصول إلى سرعته المستقرة التى يعمل بها وهى سرعة التزامن في زمن بسيط. ومع أن هذا المحرك يعد من المحركات التزامنية.. إلا أنه لايحتاج لأية وسيلة لبدء الدوران مثل الملفات أو القفص الموجود فى العضو الدوار للمحركات



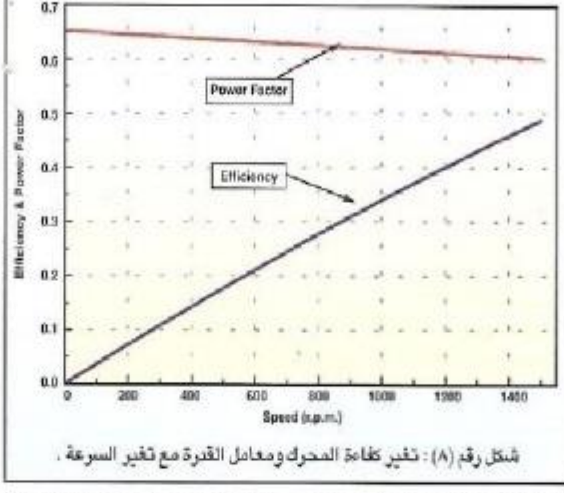
شكل رقم (٥): تغير عزوم المحرك مع تغير السرعة.



شكل رقم (٦): تغير تيارات المحرك مع تغير السرعة.



شكل رقم (٧) : تغير قدرات المحرك مع تغير السرعة .



شكل رقم (٨) : تغير كفاءة المحرك ومعامل القدرة مع تغير السرعة .

التزامنية التقليدية.

يبين الشكل رقم (٦) تغير تيارات المحرك مع تغير السرعة.. حيث يبقى تيار التعويق المغناطيسي في العضو الدوار I_h ثابتاً تقريباً للثبات التقريبي للقوة الدافعة الكهربية على أطراف المقاومة R_h.. أما التيار التأثيري I_i فإن القيمة الاكبر له تكون عند البدء ويأخذ في التناقص مع زيادة السرعة إلى أن يصل إلى الصفر عند سرعة التزامن.. وهو يقل في عمومه عن تيار التعويق المغناطيسي للزيادة الكبيرة في المقاومة المادية لهذا النوع من الحديد المستخدم في هذا المحرك.

ويعتبر تيار الدخل I_1 هو مجموع تيارات التعويق المغناطيسي والتيار التأثيري وتيار اللاحمل.. وهو ـ كما بالشكل ـ يتغير قليلاً مع تغيير السرعة. ولهذا.. فإن المحرك يتحمل تكرار البدء ولا يحتاج لأية وسيلة لانقاص تيار البدء لأنه يقارب تيار الحمل الكامل للمحرك.

يوضح الشكل رقم (٧) تغير قدرات المحرك مع تغير السرعة.. حيث تكون قدرة الخرج التأثيرية Induction Power الناتجة من العزم التأثيري ذات قيمة صغيرة وتساوى الصفر عند بدء الدوران وعند سرعة التزامن. أما قدرة خرج التعويق المغناطيسي Hysteresis Power.. فهى القدرة السائدة والناتجة من عزم التعويق المغناطيسي.. وتكون مساوية للصفر عند السرعة (صفر) برغم وجود عزم التعويق المغناطيسي لأن هذه القدرة تتناسب مع السرعة.. ثم تتزايد خطياً مع السرعة كما بالشكل. وتكون قدرة الخرج الكلية هى مجموع قدرة الخرج التأثيرية وقدرة خرج التعويق المغناطيسي. ويمثل قدرة دخل المحرك مجموع قدرات الخرج والقدرات المفقودة فى كل من رقائق حديد العضو الثابت والمقاومة المادية للفات العضو الثابت.. ويأخذ تغير قدرة الدخل الشكل الموضح.

يبين الشكل رقم (٨) كفاءة المحرك ومعامل القدرة وتغيرهما مع تغيير السرعة.. حيث تتزايد الكفاءة بزيادة السرعة لزيادة قدرة الخرج.. وتكون قيم الكفاءة منخفضة لصغر قدرة خرج هذا المحرك (فى حدود ٤٤ وات). أما معامل القدرة فإنه يبقى ثابتاً تقريباً (حول ٠,٦٠).. وهى تعتبر قيمة منخفضة فيما تعد إحدى عيوبه.

المميزات والعيوب

مما سبق.. يتبين أن لهذا المحرك العديد من المميزات التي ساعدت علي شيوع استخدامه.. منها:

- بساطة التكوين.
- يعمل بسرعة التزامن مثل محرك المغناطيس الدائم.
- عزم عال خلال فترة البدء.. مما يمكنه من البدء بأحمال عالية العزم ويجعله يتمتع بخاصية البدء الذاتى Self Starting.
- الاستقرار خلال فترة البدء وسرعة التزامن بدون تذبذبات في العزم، بسبب الشكل الانسيابى للعضو الدوار.
- تحمل تكرار البدء دون الحاجة لوسيلة إنقاص التيار عند البدء.
- عمر افتراضي طويل ولا يحتاج لصيانة تذكر.
- يعمل بدون ضجيج يذكر Noise-less .

لهذه الأسباب.. شاع استخدام هذا النوع من المحركات فى الأونة الأخيرة فيما يناسبه من تطبيقات مثل الساعات الكهربية والمؤقتات.. Timers أجهزة التسجيل الصوتية والمرئية Record players.

أما العيوب الرئيسية لهذا المحرك.. فتتمثل في:

- كبر حجمه ووزنه بالنسبة لقدرته مقارنة بالأنواع الأخرى من المحركات مما يؤدى إلى ارتفاع ثمنه.
- ارتفاع تياره بالنسبة لقدرته.. وانخفاض كفاءته وصغر معامل قدرته.

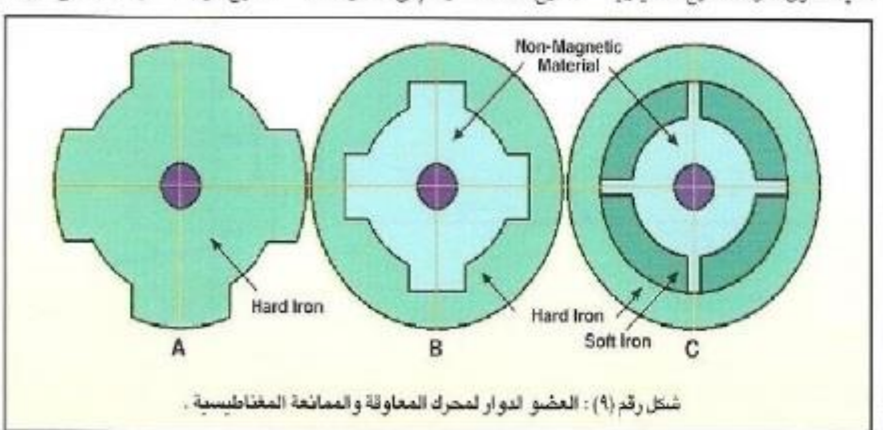
أهـم أنواعـه

يهدف تنوع محرك المعاوقة المغناطيسية إلى تحسين خواص الأداء.. حيث أن العيب الرئيسي للنوع التقليدى هو انخفاض العزم وبالتالى نقص قدرة خرجه بالنسبة لحجمه بسبب قلة كثافة المجال المغناطيسى المتبقى فى الحديد والتى تقل كثيراً عن كثافة المجال المغناطيسى الناتجة من ملفات العضو الدوار التى يمر بها تيار.

ويتمثل التنوع.. فى تهجين المحرك بأنواع أخرى من المحركات مع الإبقاء على العضو الدوار بدون ملفات يتم تغذيتها من الخارج حتى يظل المحرك من النوع الذى بدون فرش Brush-less لما لذلك من مميزات. ومن أهم هذه الأنواع:

١ ـ محرك المعاوقة والممانعة المغناطيسية Hysteresis - Reluctance Motor :

يهدف هذا النوع إلى إيجاد عزم ممانعة مغناطيسية Reluctamce Torque بالإضافة إلى عزم المعاوقة المغناطيسية Hysteresis Torque. ويحدث هذا العزم المضاف فقط عند سرعة التزامن.. ولا يزداد العزم خلال كل فترة بدء الدوران.. أى فى السرعات الاقل



شكل رقم (٩) : العضو الدوار لمحرك المعاوقة والممانعة المغناطيسية .

محركات المغناطيس الدائم Permanent Magnet Motors

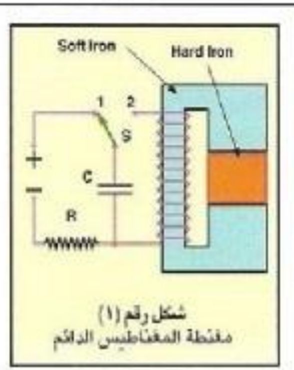
د. فتحى عبد القــادر
رئيس قسم الهندسة الكهربية وأستاذ الآلات الكهربية - هندسة شبين الكوم

يدخل المغناطيس الدائم في كثير من المحركات الكهربية التي تعمل على أى من التيارين المستمر أو المتردد ليشكل أيا من العضوين الثابت أو الدوار للمحرك.. كما يتم تهجين بعض أنواع المحركات الكهربية بالمغناطيس الدائم لتحسين خواص هذه المحركات. وسبق أن تناولنا هذه الأنواع المهجنة في الأعداد السابقة من «الكهرباء العربية».

وسوف نتناول في هذه الدراسة. أنواع المحركات الكهربية التي تعتمد على المغناطيس الدائم بالكامل في تكوين العضو الثابت أو العضو الدوار للمحرك.. إذ أن إستخدام المغناطيس الدائم في هذه المحركات يؤدى إلى تحسين كفاءة المحرك وتوفير كل الطاقة الكهربية التي كانت تستخدم لإيجاد نفس المجال المغناطيسي عن طريق ملفات توضع حول جسم الأقطاب ويمر بها تيار مستمر. وبالتالي توفير تكاليف هذه الملفات. ويؤدى استخدام المغناطيس الدائم أيضاً إلى تشغيل بعض الأنواع من هذه المحركات دون حاجة إلى استخدام فرش كربونية Brushless أو حلقات انزلاق Slep Rings أو عضو توحيد Commutator.. كما يؤدي إلى ندرة حاجة المحرك للصيانة وبالتالي زيادة عمره الافتراضي. إلا أن هذه المحركات تتعرض لسوء استخدام وعدد من المشاكل تؤدى إلى إضعاف المغناطيس الدائم أو تدهور مجاله المغناطيسي مما يتلف خواص المحرك ويصبح غير صالح للاستخدام. وللتعرف على هذه المشاكل.. علينا بيان كيفية الحصول على المغناطيس الدائم ومعرفة العوامل التي تؤثر عليه وتؤدى إلى إضعاف مجاله المغناطيسي.

يتكون المغناطيس الدائم من قطعة من الحديد الصلب أو سبيكة مواد حديدية.. ويتم وضع هذه القطعة في دائرة مغناطيسية من الحديد الطرى أو رقائق الحديد السليكوني الموضوع عليها ملف يمر به تيار كهربي عال بقدر الإمكان على شكل نبضة لجزء بسيط من الثانية حيث تتم مغنطة المغناطيس الدائم. ويوضح الشكل رقم (١) طريقة بسيطة يتم بها إتمام عملية المغنطة.. حيث يوصل مكثف C عالى السعة بقدر الإمكان إلي مصدر تيار مستمر ذي جهد مناسب للجهد الذي يتحمله المكثف.. وتوصل على التوالي مقاومة R تحد من تيار شحن المكثف ليكون مناسبا لمصدر التيار المستمر. ويتم أولاً توصيل المفتاح S في الوضع رقم 1 لعدة دقائق تكفي لشحن المكثف ووصول جهده إلي قيمة جهد مصدر التيار المستمر.. ثم يتم توصيل المفتاح للوضع 2 فتمر كل شحنة المكثف العالية خلال الملف لفترة جزء من الثانية تتم فيها المغنطة.

من هذا.. يتضح أن عملية المغنطة تتم في زمن بسيط. كما أن عملية إزالة المغنطة يمكن أن تتم أيضاً في زمن بسيط. وبنفس الأسلوب بعد تبديل طرفي الملف.. إلا أن تيار إزالة المغنطة يجب أن يكون أقل من تيار المغنطة وبالقدر اللازم فقط لوصول كثافة المجال إلى الصفر دون قيمة موجبة أو سالبة.



شكل رقم (١)
مغنطة المغناطيس الدائم

تناقص كثافة المجال المغناطيسى

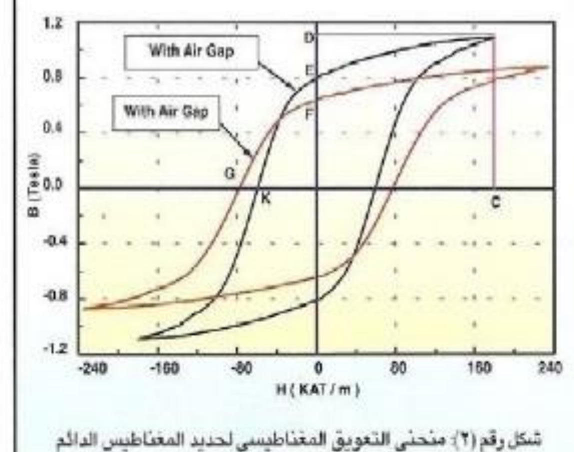
يرجع الأساس لكل عمليات المغنطة وعمليات إنقاص أو إزالة المغنطة إلى منحنى التعويق المغناطيسي Hysteresis Loop لحديد المغناطيس الدائم كما بالشكل رقم (٢).. حيث يصل التيار أثناء المغنطة إلى أقصى قيمة له تجعل شدة المجال المغناطيسي (H) عند نقطة مثل C.. وتكون أقصى كثافة للمجال المغناطيسي (B).. عند نقطة (D).. وبتلاشي تيار المغنطة أو وصول (H) إلى الصفر.. يتبقى بحديد المغناطيس الدائم مغناطيسية متبقية عالية تمثلها النقطة E. وبوضع هذا المغناطيس الدائم - بعد مغنطته - في المحرك الكهربي.. فإنه يتعرض لتأثير عدة عوامل تؤدى إلى إنقاص كثافة المجال المغناطيس الناتجة عنه. ومن أهم هذه العوامل:

١ - الثغرة الهوائية بين العضو الدوار والعضو الثابت:

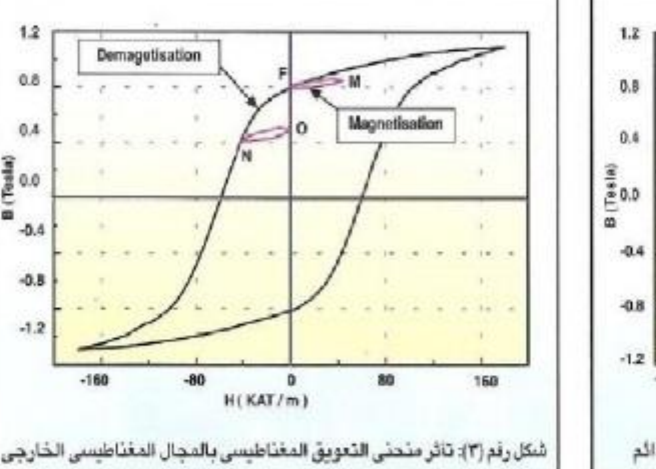
تؤدى هذه الثغرة إلى إنقاص كثافة المجال المغناطيسي لتصبح عند النقطة F بدلاً من النقطة E .. وتصبح النقطة F واقعة على منحنى تعويق مغناطيسي آخر يعتبر أفضل من منحنى التعويق الأساسي الذي كان بدون ثغرة هوائية. ويرجع ذلك إلى أن كثافة المجال الجديدة F - ولو أنها أقل من E - إلا أنه يصعب إضعافها إلى كثافة مجال(صفر) مثلاً.. حيث يوصلها إلى ذلك شدة مجال H معاكس كبير حتى النقطة G - أى سالبة - وتكون أكبر من حالة المنحنى بدون ثغرة.. حيث تكون H السالبة حتى النقطة K كما بالشكل رقم (٢). وهذا يعنى.. أن وجود الثغرة الهوائية بين العضو الثابت والعضو الدوار يجعل المغناطيس الدائم أكثر تحملاً لظروف إضعاف مجاله. وإذا حدث تغيير لأبعاد الدائرة المغناطيسية بحيث يؤدى ذلك إلى زيادة المقاومة المغناطيسية لمسار خطوط المجال المغناطيسي.. فإن هذا التغيير يشبه في تأثيره زيادة طول الثغرة الهوائية.. والعكس.

٢ - المجال المغناطيسي الخارجي:

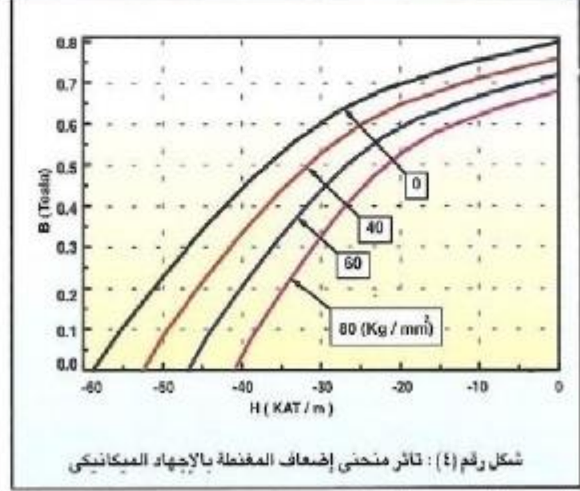
عند تعرض المغناطيس الدائم لمجال مغناطيسي خارجي من أى مصدر مثل العضو الدوار عندما يكون المغناطيس الدائم بالعضو الثابت أو العكس، فإن المجال الخارجي إما أن يساعد مجال المغناطيس الدائم Magnetising أو



شكل رقم (٢): منحنى التعويق المغناطيسي لحديد المغناطيس الدائم



شكل رقم (٣): تأثر منحنى التعويق المغناطيسي بالمجال المغناطيسي الخارجي



شكل رقم (٤) : تأثر منحنى إضعاف المغنطة بالإجهاد الميكانيكي

شكل رقم (٥) : منحنى إضعاف المغنطة لمواد مختلفة

يعاكسه Demagnetising. وإذا كانت كثافة مجال المغناطيس الدائم عندالنقطة F - شكل رقم (٣) - فإن المجال الخارجي المساعد ينقل كثافة المجال الكلية إلى نقطة أكبر مثل M. وبتلاشي هذا المجال المساعد.. تعود كثافة المجال إلى النقطة F عبر منحنى تعويق صغير FM يسمى بمنحنى التعويق الفرعي Minor Hysteresis Loop. أما إذا كان المجال الخارجي يعاكس مجال المغناطيس الدائم.. فإن كثافة المجال تنتقل من النقطة F إلى النقطة N على المنحنى الأساسي، وتقل كثافة المجال ولاتعود إلى ما كانت عليه عند النقطة F بتلاشي هذا المجال الخارجي العاكس.. بل تعود إلى قيمة أقل عند النقطة O عبر المنحنى الفرعي NO. وهكذا.. فإن تعرض المغناطيس الدائم لمجال مغناطيسي معاكس يؤدي إلى نقص كثافة مجاله حتى بعد أن يزول المجال العاكس.

٣ ـ ارتفاع درجة الحرارة:

تنتج زيادة درجة حرارة المغناطيس الدائم عادة من زيادة مفاقيد المحرك.. وتكون هذه الزيادة مقبولة في أحوال التشغيل العادية. أما إذا حدثت دوائر قصر Short Circuit في بعض ملفات المحرك.. أو تحميل زائد عن الحمل الكامل للمحرك دون أن تقوم أدوات حماية المحرك بفصله عن المصدر.. وكذلك إذا حدث حريق مجاور للمحرك فإن درجة حرارة المغناطيس الدائم ترتفع بدرجة عالية تؤدى إلى نقص كثافة المجال المغناطيسي للمغناطيس الدائم.. مما يجعل منحنى التعويق المغناطيسي بالكامل داخل منحنى التعويق الأساسي قبل زيادة درجة الحرارة .. مما يعني بالتالي أن المغناطيس الدائم أصبح لا يتحمل المجال المغناطيسي الخارجي العاكس. وتكون درجات الحرارة عالية بدرجة كبيرة بحيث تؤدى إلى إضعاف المغناطيس الدائم وهناك مواد مغناطيسية مختلفة مثل Alnico تتحمل درجات حرارة حتى ٥٠٠° م.

٤ ـ الإجهادات الميكانيكية والصدمات:

يؤدي تعرض المغناطيس الدائم للاهتزازات والصدمات وإجهادات الضغط.. إلى نقص كثافة المجال المغناطيسي. يبين الشكل رقم (٤) نقص منحنى إضعاف المغنطة De-magnetisation Curve كلما زاد الضغط الميكانيكي على جسم المغناطيس الدائم. ومع استحداث مواد جديدة تستخدم لتصنيع المغناطيس الدائم.. أصبح تأثير مثل هذه الإجهادات الميكانيكية ضعيفاً.

٥ ـ مرور الوقت والترهل:

لوحظ أنه بمرور الوقت.. تقل كثافة مجال المغناطيس الدائم حتى دون أن يتعرض لعوامل خارجية كالسابق الإشارة إليها. وترجع أسباب هذا الضعف إلى حاجة جزيئات حديد المغناطيس الدائم إلى المحافظة على اتجاهاتها التي تم ضبطها في اتجاه محدد أثناء عملية المغنطة. وإذا ترك مغناطيس دائم في الهواء لعدة سنوات دون وضع أجزاء حديدية تكمل مساره المغناطيسي وتحافظ على اتجاهات جزيئاته في نفس الاتجاه الأساسي.. فإن كثافة مجاله تضعف.

٦ ـ الإشعاع:

يؤدي تعرض المغناطيس الدائم للإشعاع بأنواعه المختلفة إلى نقص طفيف في كثافة مجاله المغناطيسي. لذلك.. يجب استخدام وسائل حاجبة Shielding لهذه الإشعاعات عن المغناطيس الدائم.

مواد المغناطيس الدائم

يصنع المغناطيس الدائم من مواد مختلفة كل منها عبارة عن سبيكة من عدة عناصر. ويهدف التنوع إلى الحصول على مواد أكثر تحملاً لدرجات الحرارة العالية أو المجالات الخارجية المضعفة أو الإجهادات الميكانيكية وخلافه.

وأكثر المواد شيوعاً في الاستخدام.. هي سبائك تسمى Alnico تشكل مجموعة عناصر مكونة من الألومنيوم والنيكل والكوبالت ونسبة طفيفة من التيتانيوم والنحاس. تصل نسبتها إلى نحو ٣٠٪ والباقي هو الحديد.

وباختلاف نسب العناصر السابقة إلى الحديد.. تتواجد نوعيات مختلفة من سبيكة Alnico كما في الشكل رقم (٥).. حيث تعطى «Alnico 5» كثافة مجال مغناطيسي عالية تصل إلى (1.3 Tesla).. إلا أنه إذا تعرض لشدة مجال معارض بسيطة في حدود (60 KAT/m) فإن مجاله يتلاشى. أما «Alnico 8» فتعطى كثافة مجال أقل (0.8 Tesla) بينما لا يتلاشى مجاله إلا إذا تعرض لشدة مجال عالية تصل إلى (140 KAT/m) كما بالشكل.

وهناك سبائك كثيرة أخرى غيرها تستخدم في تصنيع المغناطيس الدائم مثل Cunico, Cunife, Remalloy, Ferrite طبقاً لطبيعة استخدام المغناطيس الدائم.

وعندما تذكر الخواص المغناطيسية لنوع المادة المستخدمة في المغناطيس الدائم أو يتم مقارنتها بمواد أخرى يذكر فقط الربع الثاني من منحنى التعويق المغناطيسي الذي تكون فيه كثافة المجال المغناطيس B موجبة وشدة المجال المغناطيسي H سالبة.. لأن هذا الربع من المنحنى هو المعبر عن حالة المغناطيس الدائم بعد المغنطة وعن مدى تحمله للعوامل الخارجية المؤثرة كما بالشكلين رقمي (٤، ٥) حيث يسمى منحنى إضعاف المغنطة Demagnetisation Curve.

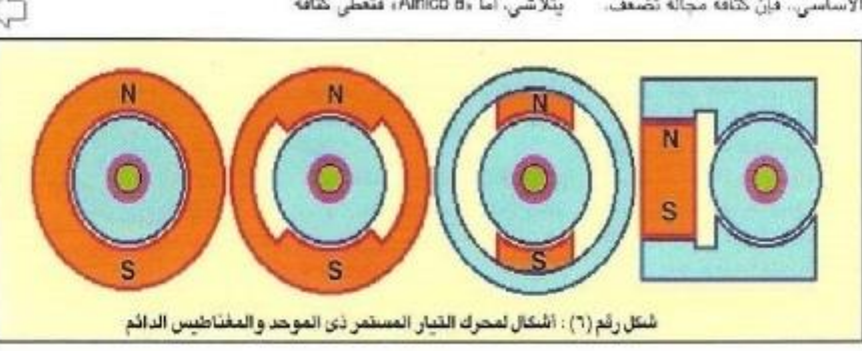
أنواع محركات المغناطيس الدائم

أ ـ محركات تعمل على التيار المستمر:

وهي نوعان أساسيان.

١ ـ المحركات ذات الموحد:

(وهي محركات تقليدية يمثل فيها المغناطيس الدائم العضو الثابت..



شكل رقم (٦) : أشكال لمحرك التيار المستمر ذي الموحد والمغناطيس الدائم

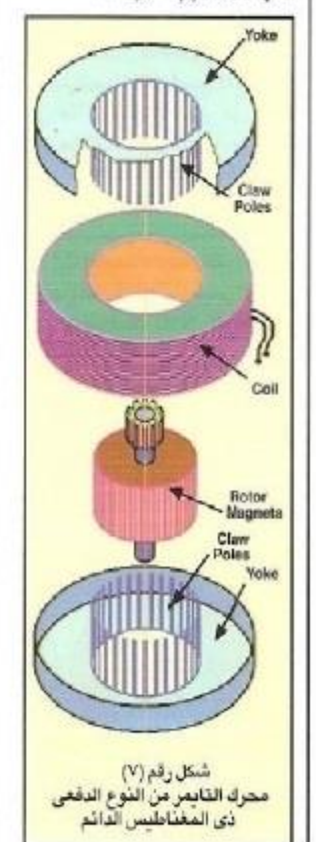


ويمثل العضو الدائر عـضو الإستنتاج وعضو التوحيد، وما زال هذا النوع من المحركات يتم تصنيعه ويستخدم على نطاق واسع في المحـركـات الصغيرة في جميع أنواع السيارات والمركبات وخلافه.. وفيها يأخذ المغناطيس الدائم صوراً متعددة كما بالشكل رقم (٦).

٢ ـ المحركات اللافرشية Brushless DC Motors:

وهي محركات حديثة يشكل فيها المغناطيس الدائم العضو الدوار للمحرك.. أما العضو الثابت فيحتوى على عدد بسيط من الملفات موزعة على المحيط. ويتم تبديل تغذية هذه الملفات على التتابع مع حركة دوران العضو الدوار بواسطة دوائر الكترونية.. وبذلك يتم الاستغناء عن عضو التوحيد التقليدي والفرش الكربونية بحيث يصبح المحرك نادر الحاجة للصيانة ويزداد عمره الافتراضي وتتحسن كفاءته. تفاصيل تشغيل هذا النوع يمكن الرجوع إليها في العدد رقم ٦٢ من «الكهرباء العربية».

ب ـ محركات تعمل على التيار المتردد ذي الوجه الواحد:



شكل رقم (٧)
محرك التايمر من النوع الدفعي ذي المغناطيس الدائم

وتوجد أيضاً بنوعين:

١ ـ المحركات الدفعية Impulse Motors:

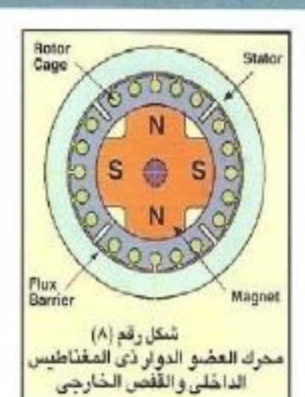
وهي محركات تستخدم على نطاق واسع في المؤقتات الزمنية Timers التي تركب في كثير من الأجهزة والمعدات. ويتكون العضو الثابت من ملف واحد محوره في اتجاه محور دوران المحرك.. ويتحمل جهد المصدر الذي يكون عادة ٢٢٠ ف ٥٠ ذ/ث.. ويعطي هذا الملف عدداً من الأقطاب في حدود ٢٤ قطباً بنظام الأقطاب المخلبية Claw Poles كما بالشكل رقم (٧). ويتكون العضو الدوار للمحرك من اسطوانة المغناطيس الدائم التي تعطي عدداً من الأقطاب في حدود ٢٠ قطباً. وفي هذا النوع من المحركات .. يختلف عدد أقطاب العضو الثابت عن عدد أقطاب العضو الدوار لكي يتواجد عزم عند بدء الدوران بالنظام الدفعي.

وتعتمد نظرية العزم الدفعي Impulse Torque خلال فترة بدء الدوران على اختلاف الخطوة القطبية للعضو الدوار عن العضو الثابت. وفي لحظة وصول تيار العضو الثابت إلى الصفر خلال موجة التيار المتردد.. تنشأ قوة جذب بين أقطاب المغناطيس الدائم وحديد الأقطاب البارزة من العضو الثابت. وبين لحظات تواجد التيار بالقيمة الموجبة أو السالبة.. يتذبذب العضو الدوار في كل من اتجاهي الدوران.. ولكي يندفع في اتجاه واحد تستخدم سقاطة Pawl وكامة Cam ميكانيكية أو أي نظام ميكانيكي يجبر العضو الدوار على القفز في اتجاه دوران واحد وعندئذ يندفع ليدور بسرعة التزامن Ns التي يتم حسابها من عدد أقطاب العضو الدوار ذي المغناطيس الدائم 2P وتردد المنبع f من العلاقة ($N_s = 120\ f/2P$) مثل أي محرك تزامني.

٢ ـ المحركات ذات المغناطيس الدائم والقطب المظلل:

وهي محركات تعتمد على إيجاد عزم تأثيري لبدء الدوران بتصنيع المغناطيس الدائم من سبيكة ذات مقاومة نوعية Resistivety صغيرة تسمح بمرور تيارات كافية بها لإيجاد عزم البدء التأثيري .. أو وضع قفص سنجابي مبسط بالعضو الدوار مع المغناطيس الدائم لإنتاج العزم التأثيري المطلوب.

أما العضو الثابت.. فيشكل قطبين ـ أو أربعة أقطاب ـ باستخدام ملف لكل قطب أو ملف واحد للقطبين في حالة المحرك ذي القطبين.. وعلى كل قطب توضع حلقة نحاسية تشكل القطب المظلل للحصول على مجال



شكل رقم (٨)
محرك العضو الدوار ذي المغناطيس الداخلي والقفص الخارجي

مغناطيسي دائري.. وبذلك تنتج تيارات العضو الدوار أو القفص عزماً تأثيرياً في بدء الدوران .. وبعد زيادة السرعة ينتج المغناطيس الدائم عزم المحرك الأساسي التزامني.

جـ ـ محركات تعمل على التيار المتردد ثلاثي الأوجه:

يتكون العضو الثابت في هذا النوع من المحركات من ملفات ثلاثية الأوجه موزعة على محيط مجاري العضو الثابت بما يماثل تماماً المحركات التأثيرية التقليدية ثلاثية الأوجه . أما العضو الدوار.. فإنه يحتوى على المغناطيس الدائم بعدد من الأقطاب مساو لعدد أقطاب العضو الثابت.

وفي مثل هذا النوع من المحركات.. إذا تم توصيل العضو الثابت بمصدر ثلاثي الأوجه ٥٠ ذ/ث مثلاً وكان العضو الدوار يحتوى على المغناطيس الدائم فقط.. فإنه لن يتمكن من بدء الدوران لأن أقطاب العضو الدوار تكون ساكنة ولن تتمكن من التجاذب مع أقطاب العضو الثابت التي تدور بسرعة التزامن. لهذا.. يجب أن يشتمل العضو الدوار على وسيلة تعطي عزماً تأثيرياً مثل قفص السنجاب منذ بداية الدوران وحتى الوصول إلى سرعة قريبة من سرعة التزامن.. والتي عندها يستمر المحرك في الدوران بسرعة التزامن الثابتة بثبات التردد. إلا أن هناك مشاكل تحدث بسبب تواجد كل من قفص السنجاب والمغناطيس الدائم.. لأنه في المحرك التزامني التقليدي الذي تنتج أقطاب العضو الدوار فيه من تيار مستمر يمر بملفات أقطابه.. لا يجب توصيل التيار المستمر إلى الأقطاب إلا بعد أن تصل سرعة العضو الدوار إلى أقصى سرعة تنتج من العزم التأثيري. وإذا تم توصيل التيار المستمر عند البدء يتأرجح العضو الدوار بتذبذبات دون أن يتمكن من الدوران بنعومة ودون أن تزداد سرعته.

وفي المحرك ذي المغناطيس الدائم..

شكل رقم (٩)
محرك العضو الدوار ذي المغناطيس الخارجي والقفص الداخلي

تحدث مثل هذه المشاكل لأنه يماثل الأقطاب المغذاه بالتيار المستمر. ولذلك.. تستخدم عدة أشكال من العضو الدوار للحد من هذه المشاكل .. ومن ذلك:

١ ـ العضو الدوار ذو المغناطيس الدائم بدون قفص سنجاب:

يتميز هذا النوع بأن الأقطاب تشغل كل العضو الدوار مما يؤدى إلى مجال مغناطيسي عال من كل قطب.. ويزداد عزم تزامن المحرك وبالتالي قدرة خرجه بالنسبة لحجم المحرك. ولكي يبدأ المحرك في الدوران.. فإنه يجب أن يعمل على جهاز مغير تردد وليس من المصدر المباشر ثابت التردد.. بحيث يغذى المحرك عند البدء بتردد منخفض يمكن أقطاب العضو الدوار من ملاحقة دوران أقطاب العضو الثابت .. ثم يتزايد التردد بالتدريج المناسب لاستمرار ملاحقة العضو الدوار لزيادة سرعة دوران أقطاب العضو الثابت وذلك حتى الوصول للسرعة المطلوبة بالتردد المناظر.

٢ ـ العضو الدوار ذو المغناطيس الداخلي والقفص الخارجي:

ويسمى Interior PM Rotor.. توضع أقطاب المغناطيس الدائم في الجزء الداخلي من العضو الدوار حول محور الدوران ـ كما بالشكل رقم (٨) ـ وخارج هذه الأقطاب توضع الشرائح الحديدة وقفص السنجاب. إلا أنه.. يجب ملاحظة أن الجزء الخاص بقفص السنجاب هنا يختلف كثيراً عن القفص السنجابي التقليدي المستخدم في المحركات التأثيرية وذلك لكي يتوافق مع وجود المغناطيس الدائم.. حيث يتم قطع جزء من حديد القفص Flux Barrier في المحور بين كل قطبين ليمنع مجال المغناطيس الدائم من إكمال دائرته المغناطيسية خلال حديد القفص.. لأنه يجب أن تكتمل الدائرة المغناطيسية للمغناطيس الدائم خلال حديد العضو الثابت حتى ينتج عزم التزامن للمحرك.وفي نفس الوقت.. فإن هذا القطع لا يكون

Mohamed Mounir تحياتي محمد منير نشرة الجزء الثاني

بالكامل لحديد القفص ويترك جزء من هذا الحديد ليسمح بمرور مجال أقطاب العضو الثابت بالعضو الدوار عندما يكون هذا المجال في أى موضع خلال فترة بدء الدوران.. والمعروف أن القطع بالكامل يحسن ويزيد عزم التزامن. ونظراً لتواجد تذبذبات عالية في العزم التأثيرى خلال بدء الدوران.. يترك جزء بدون قطع كما بالشكل وإن أدى ذلك إلى نقص بسيط في عزم التزامن.

ومن هذا النوع.. هناك أشكال أخرى للعضو الدوار لتحقيق نفس الأهداف بأساليب مختلفة.

٣ ــ العضو الدوار ذو المغناطيس الخارجى والقفص الداخلى:

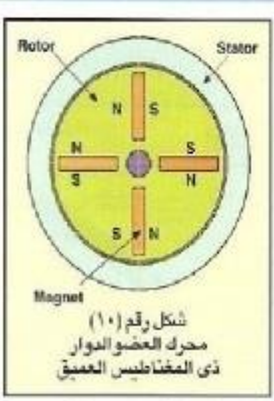
ويسمى Exterior PM Roter أو Service Magnet Rotor.. وفيه.. يتم وضع المغناطيس الدائم على المحيط الخارجى للعضو الدوار بالتوزيع المبين في الشكل رقم (٩).. بحيث يترك جزء كاف من هذا المحيط يتواجد فيه ـ مع باقى جسم العضو الدوار ـ رقائق صلب سليكونية يوضع بها قفص العضو الدوار.. أو تستبدل الرقائق والقفص بسبيكة حديدية ـ كما بالشكل ـ تتميز بالعرض الضيق لمنحنى التعويق المغناطيسى حتى تسمح بمرور خطوط المجال المغناطيسى في أى اتجاه خلال فترة بدء الدوران. تتميز هذه السبيكة أيضاً بأن المقاومة النوعية لها منخفضة عن الحديد التقليدى حتى تعطى عزماً تأثيرياً عالياً خلال فترة البدء.

ويلاحظ.. أن هذا الشكل يحقق مرور المجال المغناطيسى في أى اتجاه عند بدء الدوران لإيجاد العزم التأثيرى.. ولا يحتاج لحواجز المجال Flux Barriers التي كانت مستخدمة في النوع السابق.. لأن حديد العضو الدوار لا يكمل دائرة المجال المغناطيس الدائم ـ كما بالشكل رقم (٩) ـ وهذه ميزة كبيرة لهذا النوع.

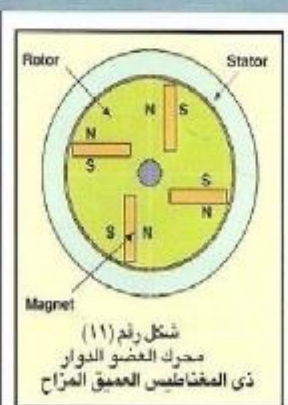
٤ ــ العضو الدوار ذو المغناطيس العميق:

ويسمى Deep PM Rotor. وفيه.. يتم استخدام مغناطيس دائم رقيق ذى كثافة مجال مغناطيسى عالية بحيث يكون عميقاً بالقرب من سطح العضو الدوار إلى قرب محور الدوران كما بالشكل رقم (١٠). ويكون باقى جسم العضو الدوار إما من رقائق الصلب السليكونى يشكل بها قفص السنجاب .. أو من سبيكة حديدية كما كان في النوع السابق. ويتيح هذا التوزيع لأقطاب المغناطيس الدائم مسارات متعددة لمجال أقطاب العضو الثابت في كافة الاتجاهات من العضو الدوار لكى ينتج عزماً تأثيرياً كافياً خلال بدء الدوران مع عزم تزامنى عال بعد استقرار سرعة المحرك.

وهناك توزيع أفضل لأقطاب المغناطيس الدائم.. بإزاحة هذه الأقطاب عن محور التماثل القطرى مسافة مناسبة كما بالشكل رقم (١١) حتى يزداد كل من العزم التأثيرى والعزم التزامنى للمحرك.



شكل رقم (١٠)
محرك العضو الدوار
ذى المغناطيس العميق



شكل رقم (١١)
محرك العضو الدوار
ذى المغناطيس العميق المزاح

وفى كل الأنواع السابقة التى تعمل على التيار المتردد ثلاثى الأوجه.. إما أن يكون المصدر الكهربى هو المصدر التقليدى ذو التردد الثابت(٥٠ ذ/ث) وفى هذه الحالة يجب أن يعطى المحرك عزماً تأثيرياً عالياً خلال فترة البدء.. أو يكون المصدر هو أحد أنواع أجهزة تغيير التردد وفى هذه الحالة يمكن أن يكون العزم التأثيرى للمحرك صغيراً ويكون كافياً لتوصيل المحرك إلى السرعة التزامنية.

فى العدد القادم:
اختبار المحركات الكهربية